ANALISI DI RISANAMENTO DI GALLERIE ESISTENTI

Mirafiori Natale

Consulente e Ricercatore – sicurezza stradale

ANALISI DI RISANAMENTO DI GALLERIE ESISTENTI

ARGOMENTI

PRIMA PARTE – *Lavori di esecuzione gallerie presenti in Europa. Con alcuni intereventi esecutivi.*

● Introduzione

● Il comportamento dei terreni e degli ammassi rocciosi allo scavo di un'opera in sotterraneo

● Evoluzione dei metodi di scavo

● Tecnica di scavo con esplosivo

● Tecnica di scavo meccanizzato tradizionale (perforatrici, ecc.)

● Tecnica di scavo meccanizzato non tradizionale: le frese e gli scudi

● Smarino e macchine usate per il trasporto

● Metodi di avanzamento a sezione parzializzata e a sezione piena

● Tipi di armatura e di rivestimento

● Interventi di preconsolidamento

● Impermeabilizzazione in galleria

● Il foro pilota come metodo di progettazione di gallerie (con esempi)

● Lo studio dell'effetto scala (con esempi)

● Intervento di preconsolidamento in – jet-grount – micropali ecc

●Rivestimento di prima fare in galleria con calcestruzzo proiettato di spessore variabile – spritz-beton

● Le fibre d'acciaio nello spritiz – beton

● Nuovo spritz – beton per rivestimento in sotterraneo

● Impermeabilizzazione di gallerie in guaina – PVC – PVC flessibilizzato

● Impiego delle guaine di bentonite per l'impermeabilizzazione di gallerie

●Rivestimento di seconda fase in calcestruzzo o calcestruzzo armato

SECONDA PARTE. *Metodi di intervento per una corretta esecuzione del risanamento e in convogliamento delle percolazione nelle vecchie gallerie senza deviazione del traffico.*

●Adeguamento statico dei rivestimenti delle gallerie esistenti.

●Rilievo elettromagnetico con metodi geofisici radar per la realizzazione di profili radastratificati nelle gallerie

●Riempimento di vuoti a tergo con iniezione di calcestruzzo normale o alleggerito

●Esecuzione di fori di ancoraggio ed il posizionamento di barre di ancoraggio chimici o con malte tixotropiche

●Scarificazione dei calcestruzzi ammalorati

●Confronto tra alcuni progetti esecutivi nel risanamento delle vecchie gallerie con vari sistemi adottati

●Risanamento del calcestruzzo nella galleria con vari tipi di malte

●A confronto vari tipi di pannelli per l'arredo delle gallerie

◘ALUCOBOND

◘ISO – ALL

◘KORRUGAL

◘GLASAL

◘Pannelli in policarbonato POLICOT

◘Pannelli in ACCIAIO A CARBONIO ZINCATO

◘PANNELLI IN ACCIAIO INOX

●Analisi chimica e confronto dei vari pannelli di arredo gallerie

●Analisi chimica delle acque di percolazione e la loro aggressività nei confronti dei vari tipi di pannelli di arredo gallerie

●Comportamento a verificarsi di un incendio in galleria dei vari tipi di pannelli di arredo in galleria ed educazione dell'utente

●Confronto tra alcune tipologie di progettazione e installazione di illuminotecnica

L’autore.

Natale Mirafiori - Consulente e Ricercatore – sicurezza stradale. Via S. Bartolomeo del Fossato, 8/5 - 16149 Genova Tel. 010/418.310 Fax 010/465.504 - 335/58.65.939
Internet: www.mirafioricr.it E – Mail info@mirafioricr.it;

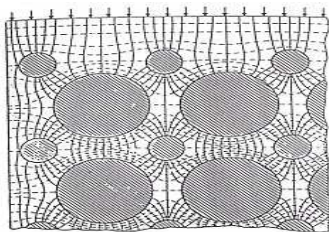
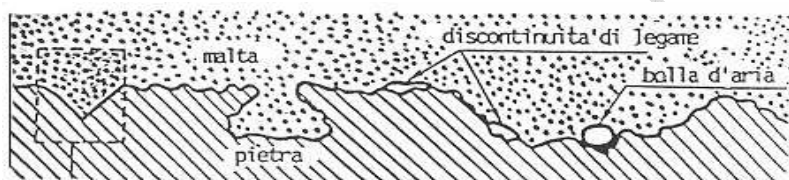
Alcuni brani del libro

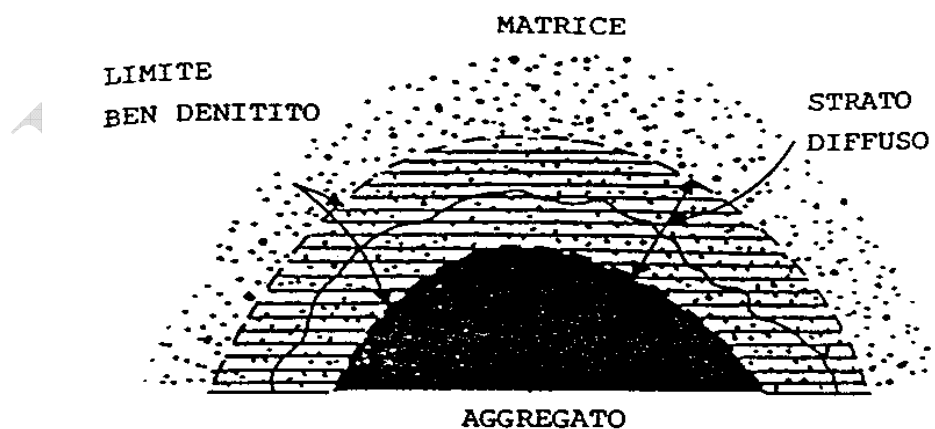
IL CALCESTRUZZO MATERIALE COMPOSITO

I1 calcestruzzo è senz’altro il materiale di maggiore impiego nelle costruzioni, con un consumo che va crescendo negli ultimi anni. Ciò nonostante la diffusione della conoscenza delle sue proprietà, ed in particolare del suo comportamento nel tempo è molto scarsa. Si sa che basta mescolare: sassi, pasta di cemento e acqua, in generale senza una misura sufficientemente precisa, e che detto miscuglio, dopo qualche ora, inizia ad indurire. Manca una cultura adeguata per un materiale come è il calcestruzzo, eterogeneo ed anisotropo e che come tale va considerato partendo prima dalla sua microstruttura oltre che dalla sua struttura di insieme. Ma anche nel campo della progettazione si può dire che non esista la consapevolezza di considerare il calcestruzzo come una sommatoria di proprietà legate alla sua microstruttura.
Un'opera infatti viene normalmente descritta mediante indicazioni geometriche - sezione, altezza e dimensioni in genere, accompagnate da indicazioni prestanzionali - resistenza o sollecitazioni ammissibili, le une e le altre assolutamente astratte rispetto alla complessa realtà del materiale con cui la struttura verrà realizzata. Anche se per strutture di una certa mole si pone qualche attenzione alle caratteristiche dei materiali, considerando il ritiro, la viscosità o il coeficente di dilatazione termica del calcestruzzo, lo si fa con calcoli formali senza entrare nella realtà fisica.. I1 calcestruzzo in realtà si mostra paziente rispondendo generalmante bene alle aspettative, ma quanto viene sottoposto ad aggregazione improprie o perché non e stato adeguatamente progetta, talvolta non riesce un precoce decadimento.

STRUTTURA E MICROMECCANICA DEL CALCESTRUZZO

I1 calcestruzzo è una miscela più o meno proporzionata di alcuni componenti fondamentali: aggregato cemento - acqua con presenza costituzionale di aria e, in molti casi, di additivi. Per tale materiale composito sono stati proposti modelli di comportamento fisico meccanico, il più semplice dei quali prevede tre fasi:
Pasta cementizia (matrice)
Aggreganti (fase dispersa)
E fra questi due fasi:
la zona di transizione di interfaccia, aureola di transizione.
E' noto che le proprietà di un materiale multifascio possono essere notevolmente superiore a quelle delle singole fasi se presi separatamente; in particolare ciò si riscontra quanto il materiale delle singole fasi è un materiale debole o fragile. Nel caso del nostro materiale si sa che né la roccia né la pasta di cemento puro può essere

usata vantaggiosamente come materiale da costruzione:
Andamento della traettoria delle tensioni principali in un modello con inclusioni di differente grandezza.

La roccia perché troppo fragile, la pasta di cemento perché si fessura per perdita d'acqua. Tuttavia questi materiali legandosi insieme formano il più versatile di tutti i materiali da costruzione: il calcestruzzo. Se i componenti del calcestruzzo aggregato e matrice avessero un modulo elastico uguale od approssimativamente uguale, non si produrrebbero, in corrisondenza della interfaccia, quelle tensioni di trazioni che causano la formazione di microincrinature, in quanto aggregato e matrice agirebbero in questo caso come un materiale omogeneo. Ciò condurrebbe probabilmente ad una maggiore resistenza ed in ogni caso ad una assenza di incrinature nel calcestruzzo sotto carico fino al quasi completo esaurimento della sua capacità di resistenza.

Rappresentazione magroscopica della zona di contatto matrice – aggregato

Nel calcestruzzo normale per quanto riguarda il modulo elastico non esiste generalmente una grande possibilità di scelta tra diversi aggreganti naturali compatti, poiché questi debbono essere scelti, per motivi economici, generalmente secondo la loro disponibilità locale. Il modulo elastico delle rocce naturali compatte e sufficientemente resistenti per calcestruzzo oscilla in prevalenza ad un valore di 7.10,5 kg/cm2.

Interazione fisica – chimica matrice - aggregato

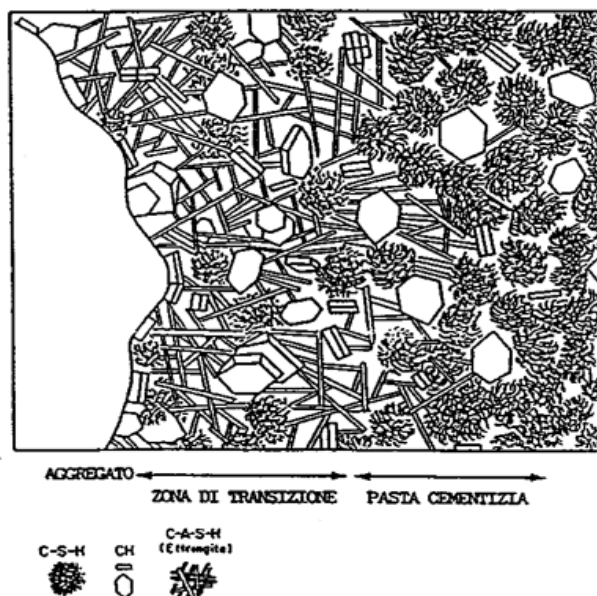
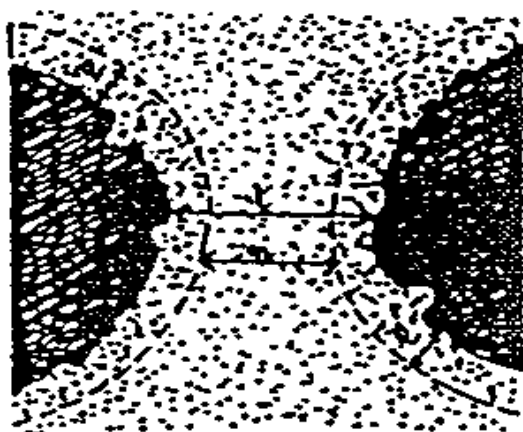
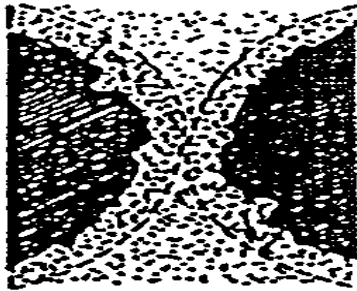
Pietre arenarie a resistenza minore, che tuttavia non sono indicate per calcestruzzo normale di buona resistenza, hanno un modulo elastico compreso tra 3 e 4,10,5 kg/cm2. Il modulo elastico del gel cementizio che si forma nell'idratazione del cemento e, estrapolato per uno stato privo di pori dell'ordine di grandezza di 4.10,5 kg/cm2. I normali cementi induriti (con pori del gel e pori capillari) hanno un modulo elastico di soli 1-2.10,5kg/cm2.Comunque il il modulo elastico dell'aggregato nel calcestruzzo normale e sempre di almeno il doppio di quello della matrice.

LA ZONA DI TRANSIZIONE DEL CALCESTRUZZO

Come notoriamente riconosciuto dell'esistenza di una zona ove si accentuano le tensioni che, se pure a seguito di un carico esterno di compressione, sui lati degli aggreganti risultano di trazione.
Si tratta della zona di contatto o di transizione situata tra l'aggregato e la matrice . In essa si forma una discontinuità accidentale o indotte per ritiro, di bolla d'aria costituzionale o di aggiunta, incavi di rugosità, in ogni casi si ha che fare con una zona molto tormentata. Tra le due fasi possono risultare puramente fisiche di adesione e di interconnesione meccanica dovuta alla forma dell'aggregato e al suo grado di rugosità superficiale o generata da aggrappi, entro porosità, conseguenti al ritiro della matrice cementizia. Le forze di legante possono formarsi anche a seguito di interazione chimiche e/o cristallo chimiche. In tal caso vengono interessati strati di un certo spessore sia sull'aggregato che sulla matrice.

MALTE CON SABBIE DI CLASSE GRANULOMETRICA 0,160÷0,315 mm E CEMENTO PORTLAND

cemento	a/c	distanza tra i granuli t in µm	spessore in um dell'aureola per malte con sabbia calcarea	silicea
420	0,74	65	32	-
490	0,64	70	19	-
530	0,59	80	13	34
580	0,54	90	8	27
650	0,48	100	5	20
690	0,45	110	3	15

Spesso le forze di legame risultano una combinazione di tipo fisico. In ogni caso e particolarmente quanto il legame è puramente meccanico, ed è la maggioranza dei casi nella pratica, la zona di interfaccia, come si è già detto, è molto complessa con una costituzione e stratificazione sebbene composta dagli stessi elementi la sua struttura e proprietà sono differenti da quelli della pasta cementizia vera e propria.
Sulla fase di transizione detta anche aurelia di transizione, qualche indicazione sui fattori da cui dipende la sua formazione: per un dato aggregante e per un dato cemento, il suo spessore cresce con il rapporto acqua cemento e, in condizioni normali di stagionatura, decresce con i tempi di maturazione.

Risulta comunque utile schematizzare le posizione reciproche delle aurelie di transizione tra gli aggregati dispersi nella massa del calcestruzzo, ciò in relazione al suo contenuto di pasta e quinti il dosaggio minimo di cemento. Cosi ne deriva che un calcestruzzo, generalmente sempre aureolato anche se interessato da una discreta porosità dispersa, garantisce una buona o sufficiente resistenza meccanica; non altrettanti si può dire, che lo stesso abbia, con pari volumi di vuoti, una buona o sufficiente permeabilità, mentre la saldatura per punti permette l'ottenimento di un calcestruzzo resistente, solamente una saldatura di tipo continuo assicura la su impermeabilità.
Così si cade proprio nel caso di una saldatura per punti quanto gli aggregati risultano distanziati, in relazione con il dosaggio di cemento.

Le aureole a secondo dei casi, hanno spessori che vanno da 3 a 35 um e dato che ad esempio per calcestruzzi con o max 30 mm, dosati 200 - 400 kg/m3 di cemento, si calcolano valori di t compresi fra 40 e 60 nm, si può concludere che le aureole e la distanza di dispersione tra gli aggregati.

AUREOLE TANGENTI

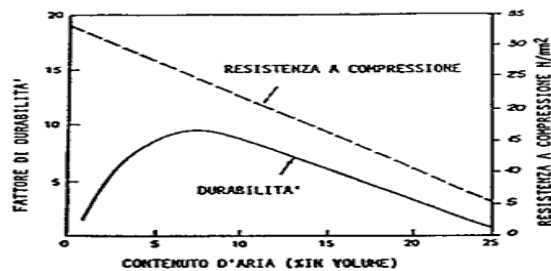
$t = 2a$

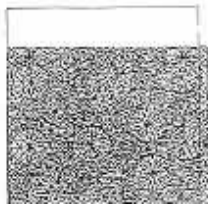
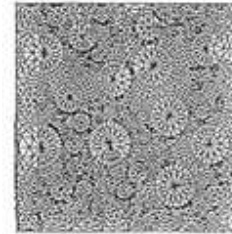
Hanno dimensioni dello stesso ordine di grandezza. Per cui al di sotto di un certo dosaggio di cemento gli aggregati risultano mediamente distanziati dal solo strato di disordine interfacciale.

AUREOLE INTERSECATE

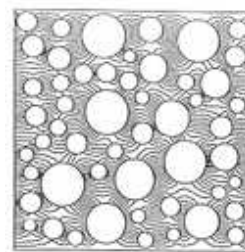
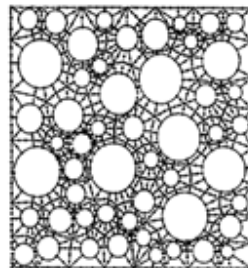
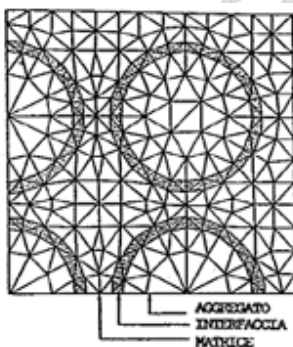
$t < 2a$

CALCESTRUZZO DURABILE

Affinché un calcestruzzo risulti durabile, la resistenza meccanica può costituire una condizione necessaria ma non mai sufficiente e, a parità di ogni altro fattore, il calcestruzzo più durevole in genere non coincide con il calcestruzzo più resistente agli attacchi del gelo per il quale esiste un contenuto timun di aria occlusa che ne assicura la massima durabilità, ovviamente a scapito di una certa resistenza.

MECCANISMI DI DURABILITA'

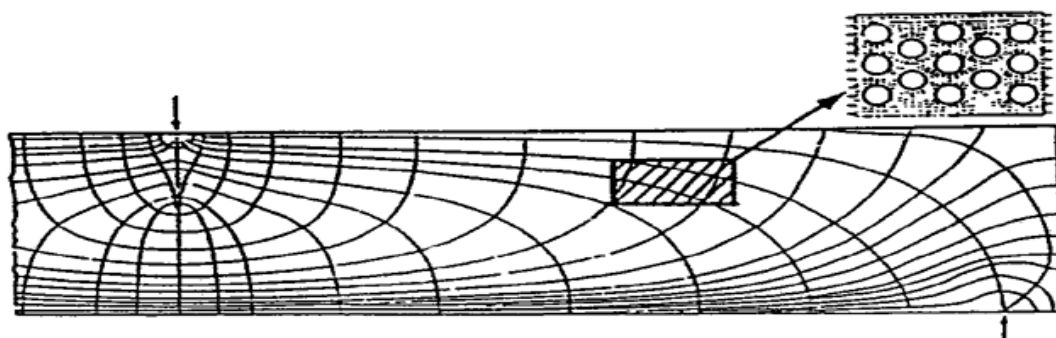
Per una migliore comprensione dei meccanismi riguardanti la durabilità del calcestruzzo, e opportuno integrare i concetti e le rappresentazioni sulla sua micromeccanica, modellando questo tipo di struttura composita.

Deformazione del modello

Modellazione del calcestruzzo mediante
precedente soggetto.
Elementi finiti triangolarui a carico di
compressione.

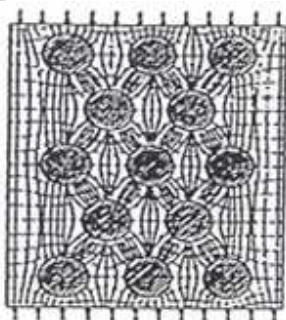
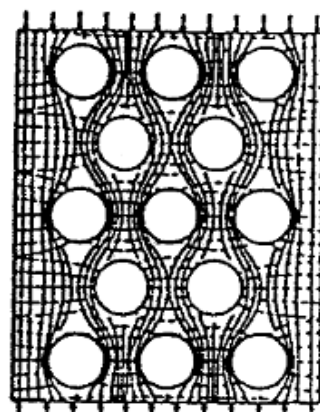
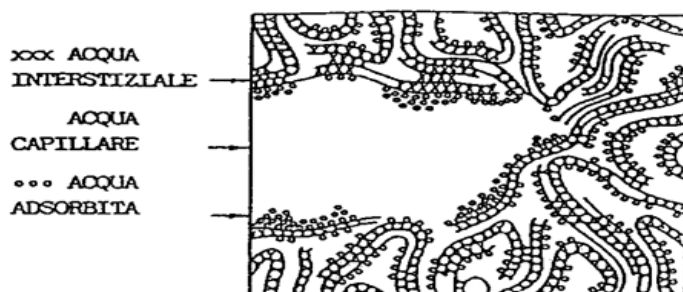
Comportamento meccanico di una struttura porosa sottoposta a carico esterno.

Si parte ancora da una sezione causale di un solido costituito da un sistema di sfere disperse in una matrice di leganti e per lo studio dei trasporti oltre che dallo stato tensionale ciawale dell'analisi numerica basata sulla discretizzazione del continuo in elementi finiti, ciascuno dei quali può essere caratterizzato da singole proprietà meccaniche e fisiche. In questo e senza lunghe sperimentazioni si può valutare l'effetto concatenato dei diversi parametri propri della tecnologia del calcestruzzo – rapporto acqua cemento, dosaggio in cemento distribuzione granulometrica, additivi eccede in particolare, sulla permeabilità, ed l'influenza su di esso delle differenti sollecitazioni di tipo fisico, chimico o meccanico.

Curve
Modellazione del calcestruzzo mediante rappresentazione di una struttura isoigrometrica.
Elementi finiti con presenza della zona composita mediante elementi finiti modello di
materiale composito
Interfacciale speciali per lo studio dei processi di sottoposto ad un gradiente di
Diffusione igrometrica umidità

Dopo questo breve accenno sulla validità e sulle possibilità offerte dal calcestruzzo reale, è necessario individuare lo sviluppo dei processi fondamentali, dovuti ai fenomeni di trasporto e alla presenza di acqua che hanno una influenza dominante sulla sua curabilità, partendo dal fatto che il calcestruzzo e un materiale poroso, prendendo in considerazione sia il trasporto di gas che di acqua nonché la presenza di agenti aggressivi disciolti e l'insorgere di reazioni chimiche.
La velocità, gli effetti del trasporto e le reazione chimiche sono largamente dipendenti dalla struttura porosa e dal microclima sulla superficie del calcestruzzo. La struttura porosa e il riempimento dei pori con acqua sono fattori determinanti per la permeabilità del calcestruzzo ai gas e alle sostanze in soluzione. Con il processo di trasporto legati strettamente ai relativi meccanismi di corrosione – penetrazione dell'acqua, diffusione dei cloruri, carbonatazione ecc.

PERMEABILITA' DEL CALCESTRUZZO

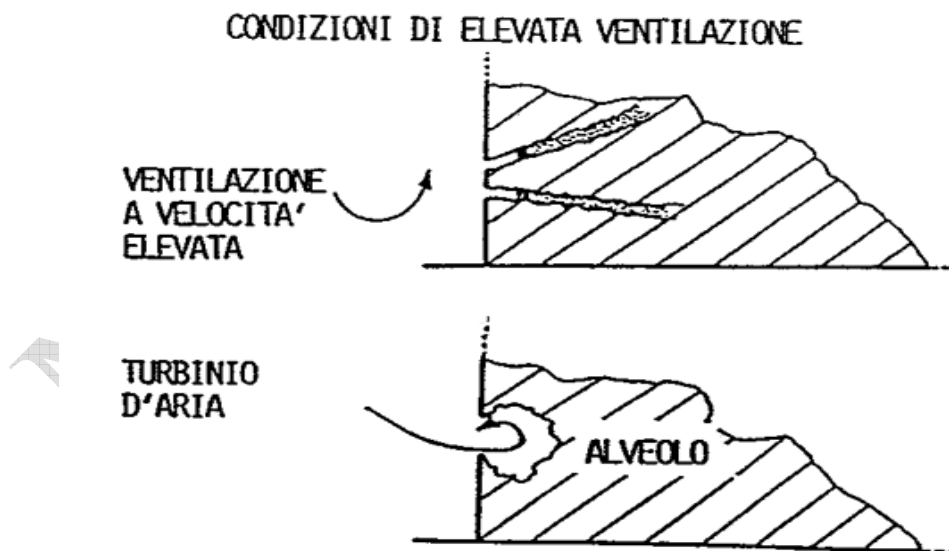
L'acqua ne calcestruzzo va considerata sotto un aspetto particolare poiché, è presente sin dall'inizio come un ingrediente necessari per le reazioni di idratazione del cemento e come agenti plastificante della miscela dei suoi componenti.

Traettoria delle tensioni principali di una struttura caricata
Con gradualità, in dipendenza dalle condizioni ambientali e dello spessore della struttura, molta dell'acqua iniziale viene dispersa lasciando vuote o parzialmente insature le porosità della pietra cementizia.

Calcestruzzo normale

Calcestruzzo degradato

E opportuno ricordare qualcosa sulla pietra cementizia che matura ossia che la pasta cementizia la dispersione delle acque al suo interno e la maturazione e di circa 28 giorni di stagionatura .

Forma d'acqua presenti nella pasta cementizia.

All'interno dell'ammasso cementizio rimane una struttura ancora irrisolvibile chiama gel di cemento.
La formazione del gel che occupa un volume di circa il doppio di quello del cemento originale da cui si formato, coincide con un enorme sviluppo della superficie specifica della massa stessa, si può passare infatti da 2-3.00 cmq/g, dei granuli di cemento anidro, a 2.000.000 cmq/g, con un aumento di circa 1000 volte. Questa e una condizione necessaria allo sviluppo delle resistenze ed in ogni altro fenomeno allo sviluppo della resistenza. Nella psta cementizia già indurita l'acqua può resistere in diverse forme Acqua capillare presente nei vuoti.
Acqua adsorbita sotto l'influenza delle forze di attrazione le molecole di acqua risultano fisicamente adsorbite sulle superficie degli idrati.
La perdita d'acqua assorbita è responsabile del ritiro per essicazione.
Acqua tra gli strati o interstiziali: viene associata con la struttura dei silicati e la sua rimozione che li altera Considerevolmene.
Acqua chimicamente combinata: è parte integrante della struttura dei vari prodotti di idratazione, non si sposta con l'essicazione ma per decompressione degli idrati con il calore.

CONCLUSIONI GENERALI

Con la scelta del tipo di cemento per il rivestimento definitivo di una galleria, vengono esclusi o limitati al massimo i composti che possono reagire con le acque solfatiche o comunque aggressive formando sali espansivi o che possono facilitare il cambiamento di struttura della pasta di cementizia. Si deve impiegare un cemento tale da evitare la formazione di ettringite che e decisiva nel processo di distruzione delle matrice cementizie nei mezzi solfatici al di sopra di 20 °C ossia un cemento a basso contenuto o meglio sarebbe addirittura privo di C3A. I1 controllo però delle trasformazione delle fasi alluminiche risulta soltanto una condizione necessaria ma non sufficiente per evitare l'attacco solfatico distruttivo perché al di sotto di 10 °C la formazione di thaumasite, che riguarda, la trasformazione delle fasi silicatiche sulla pietra cementizia, gioca sempre un ruolo determinante. Per cui alle basse temperature è sempre necessario limitare il contenuto di c 3 s nel clinker, al di sotto del 60%.

Inoltre per una migliore resistenza ai solfati e consigliabile di prendere in considerazione oltre al tenore in C 3 A e C 3 S del clinker stesso, un eventuale sua abbinamento con pasta di cemento pozzolanica. In effetti una pasta di cemento pozzolanico qualora non richieda più acqua per l'impasto accresce in genere la resistenza all'attacco dei solfati. Comunque e da tener presente che l'effetto positivo dipende dal tipo di pozzolana e non soltanto dalla sua attività pozzolanica.
I1 dosaggio di cemento e da mettere in relazione con la curva granulometrica dello aggregato di cemento ed e consigliabile con un diametro max intorno ai 30 mm non deve risultare inferiore ai 300 kg/m3.
Infatti basilare è restare con il rapporto acqua- cemento al di sotto di 0,5 per cui è necessario prevedere l'impiego di superfluidificante.
Bisogna comunque sempre tener presente con il clima esistente in generale nelle galleria in cui si opera, che comunque non sembra necessari l'impiego di additivi areante: per questo forse può migliorare o almeno ritardare l'effetto distruttivo dei solfati.

Regolando il dosaggio di cemento e quello dell'acqua - cemento la permeabilità globale del calcestruzzo, aggregato matrice e quella della matrice vera e propria può scendere al disotto della soglia di sicurezza.
Per concludere per la confezione del calcestruzzo i fattori da prendere in considerazione sono:

Cemento ferrico pozzolanico;
Dosaggi in relazione alla curva granulometrica ed al max diam.;
Rapporto acqua - cemento < 0,50;
Impiego di additivo super Pluidificante e forse anche aerante;
Stagionatura umida da rispettare per il tempo sufficiente.

Rivestimenti in cemento armato

La durabilità dei rivestimenti in una galleria avrebbe dovuto essere un punto essenziale per la loro affidabilità. Oltre che alla tipologia ed al tipo di rivestimento gran parte della durabilità è affidata a quella del materiale che la costituiscono e, nel caso del cemento armato, è la carbonatazione seguita dalla corrosione delle armature il nemico da convincere.
Per permettere al cemento armato una maggiore durabilità è risaputo che nella prescrizione bisognerebbe indicare il copriferro di almeno 5/6 cm per tutta una serie di prescrizione che questo tipo di copriferro costituisce.

Queste prescrizioni possono sembrare eccessive ma in base a degli studi precisi, questo comportamento può assicurare 25/30 anni di non carbonatazione del copriferro e la protezione alcalina dell’acciaio medesimo; questo, come è ben noto, impedisce la corrosione dei ferri di armatura. Nella ricerca della durabilità dei manufatti in cemento armato vi sono dei paesi dove viene applicata costantemente è ne hanno fatto il loro cavallo di battaglia, gli stessi paesi hanno anche scoperto che questo tipo di accorgimento non li protegge da tutti i tipi di corrosione, perché per esempio gli ioni cloro danno la corrosione per pitting non sono fermati dall’alcalinità della pasta di cemento.
Se questo sistema di copriferro 5/6 cm , già di per se richiede degli attenti magisteri e progettazione adeguata nelle dimensioni e delle casseforme, si possono ottenere 25/30 anni di certezza sulla protezione dalla corrosione delle armature, Se ci fermiamo un attimo a riflettere che tipo di certezze ci possono essere in Italia sulla protezione dei calcestruzzi armati costruiti negli ultimi 30/40 anni con scarsa attenzione ai materiali (inerti ricavati direttamente dallo scavo delle gallerie senza essere vagliati o lavati – al cemento senza un dosaggio coerente – con slamp approssimativi ecc.) costituenti, e con copriferri che non superano lo 0,5 – 1 cm . Per cui la problematica della durabilità inizia dal copriferro e questo viene confermato dalla nostra personale esperienza nelle manutenzioni stradali e autostradali in gallerie. Quinti nella stragrande maggioranza dei casi quando si fanno manutenzioni nella gallerie con la loro assenza di impermeabilità ed un adeguato copriferro si aggravano ulterioralmente le condizioni strutturali del manufatto. La ricostruzione del copriferro si è cercata di ottenere negli anni con vari tecnologie sempre più precise, che sono partite dalle gunite, presto abbandonate per la loro porosità, sono passate attraverso i calcestruzzi reoplastici a ritiro compensato, che anno impresso una svolta senso non si sa quanto positivo alla soluzione del problema della riparazione delle gallerie, pur cercando di mantenere una serie attenzione per ciò che riguardasse la scelta dei materiali cercando possibilmente quelli con meno pasta di cemento, con maggiore aderenza al supporto ed il ritiro compensato in fase plastica per avere una affidabilità sui risultati di durata.
Comunque il vero problema delle gallerie stradali in Italiani è la mancanza di una manutenzione programmata delle opere in sotterrane ed una non attenda valutazione dei progetti tra durabilità e spesa che spesso non si produce in chi più spende meno ma adesso facciamo questo poi qualcuno ci penserà.
Con l’affermazione delle nuove tecniche orientate su armatura con profilati e reti del cielo di scavo “a perdere” nel getto, coadiuvata o no da spritz-beton, migliorano decisamente ed

accelerano l’esecuzione del rivestimento stesso, consentendo una meccanizzazione più spinta.
E’ pertanto possibile procedere dopo il disarmo ad un rapido smontaggio delle centine, ed alla loro risistemazione a monte, verso il fronte, sul nuovo anello. Nel suo tipo più brillante questa operazione si eseguiva impiegando casserature metalliche a manto incorporato, con nervature a cerniera per un rapido piazzamento e disarmo, traslate con carrello porta forma.
Per il resto l’attrezzatura di getto non differisce da quella dei cantieri normali salvo uno spiccato impiego di pompe da calcestruzzo usate su corte distanze alle testate dei Cantieri di calotta.

SICUREZZA IN GALLERIA

La sicurezza nelle gallerie autostradali è un elemento determinante nel quadro della sicurezza, vista nella sua globalità, di un tracciato autostradale.
La progettazione, intesa nel senso integrato del termine, deve pertanto garantire, con gli opportuni parametri geometrici, quelle caratteristiche di percorribilità che sono la base per la sicurezza di guida dell'utente. Il tracciato autostradale dovrà avere, per quanto riguarda naturalmente gli aspetti progettuali e costruttivi, anche nella parte in galleria , quella continuità di comfort e sicurezza che troviamo nel tracciato all'aperto.
Per raggiungere questo obiettivo, una volta stabilito l'intervallo di velocità di progetto, si prendono in considerazione due aspetti dell'opera:
le caratteristiche geometriche: sezione piattaforma stradale, raggi di curvatura, livellette e relativi raccordi;
B - gli impianti: questi assumono nel tratto in galleria, una importanza determinante agli effetti del comfort e del livello di sicurezza per l'utente.
A.1 - Riguardo alla composizione della piattaforma stradale nei tratti in galleria le Norme Cnr prevedono per le strade di tipo I, II, III e A, una piattaforma realizzata con numero e dimensioni delle corsie identiche a quelle relative alla sezione corrente, affrancate su ciascun lato da una striscia di margine larga 0,25 m con un marcia piede di servizio di larghezza > 0,85 m e sopra elevato di 15 cm.

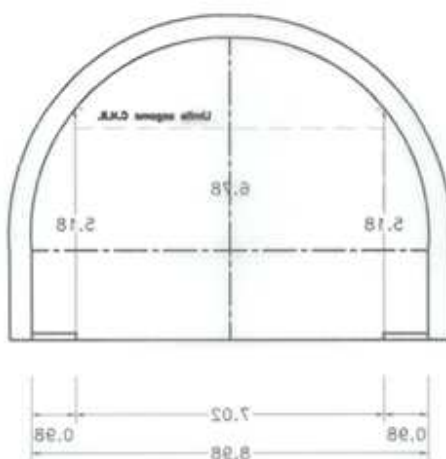



Fig. 1

Inoltre per le strade di tipo A si devono distanziare e separare le carreggiate nei tratti curvilinei applicando le norme sulla geometria degli assi di cui al cap. 3 delle Norme stesse.
Mentre nei tratti in rettifilo la separazione degli assi delle singole carreggiate deve effettuarsi gradualmente su una lunghezza

$$L \geq 0,45\ V\sqrt{t}$$

L = in metri
V = velocità di progetto in km/h
t = differenza in metri tra la distanza iniziale e quella finale degli assi.
L'altezza libera nella galleria misurata a partire dalla carreggiata deve essere ≥ 4,75 m.

A.2 - Geometria dell'asse autostradale Particolare attenzione dovrà porre il progettista nel rispettare i minimi previsti dalle Norme Cnr per i valori che riguardano le visuali libere, le distanze di visibilità la pendenza trasversale, i raccordi delle livellette e, più in generale, l'ottimizzazione dell'andamento plano-altimetrico dell'asse stradale.

Foto 1

Le Norme prevedono inoltre che nelle gallerie a doppio foro, di lunghezza superiore a 1 km, debbono prevedersi dei by-pass posti a una distanza tra loro non superiore agli 800 m, che consentano il passaggio dei veicoli da una carreggiata all'altra. Le gallerie, sempre di lunghezza non inferiore ai 1.000 m devono essere dotate di appositi slarghi, per il ricovero dei veicoli in avaria con un distanziamento che non deve superare i 1.000 m per una galleria a due fori e i 500

B. 1 - Una volta che il progetto è stato ben impostato sotto l'aspetto plano-altimetrico e si sono curati i raccordi agli imbocchi della galleria, la sicurezza dipende dagli impianti che in essa si prevedono e che sono in rela zione alla lunghezza della galleria stessa.

La relazione sicurezza-impianti, e quindi corrispondente impegno finanziario, non è di tipo lineare ma è una funzione di tipo esponenziale e pertanto più è il livello generale di sicurezza più è costosa l'acquisizione di ogni piccolo incremento della stessa. (Foto 2)

Per poter affrontare il problema del risanamento delle gallerie esistente, innanzitutto:

Bisogna provvedere fare un rilievo topografico completo per il controllo della geometria della galleria, comprendere la determinazione delle stazione, il rilievo plano-metrico dei vari punti notevoli della struttura per il raffronto dello stato attuale con la geometria del progetto, effettuato per sezioni ad ogni ripresa di struttura e rivestimento.
Prelievo di campioni di calcestruzzo anche armato, di rocce e terreno di qualsiasi natura e consistenza.
Prova di compressione su carote di calcestruzzo.
Determinazione della degradabilità mediante solfati
Determinazione del contenuto dei solfati
Determinazione del contenuto dei cloruri
Analisi delle acque percolanti attraverso i rivestimenti di calcestruzzo, e la determinazione della loro aggressività e del tenore calcareo.
Il problema dello stato di conservazione delle gallerie della rete stradale ed autostradale Italiana, realizzate in un arco di tempo compreso tra i trenta e cinquant'anni addietro, e della loro conseguente manutenzione non sempre adeguata e tempestiva, presentano aspetti gravi e complessi, in relazione alla mancata impermeabilizzazione dell'intera superficie escavata e alla non definizione del trattamento di protezione della parte di roccia influente sull'estradosso dei rivestimenti di sostegno, e inoltre per la mancanza di drenaggio.

Foto 3

Foto 4

Pur vero che in qualche realtà presente ma non sufficiente a garantire un buon drenaggio delle acque, fatto per lo più in ciottoli di pietra che, con il trascorrere del tempo, e della percolazione delle acque ed il trasporto del limo terriccio, a finito per intasare completamente quel poco di drenaggio esistente rendendolo vano.
Pertanto le numerose gallerie mostrano una sintomatica condizione di deterioramento e ammaloramento. I segni di questo "invecchiamento" si evidenzia con particolare attinenza alle situazioni d'intradosso del rivestimento, il cui grado di ammaloramento è spesso rilevabile anche ad un primo sommario esame visivo superficiale.
Il calcestruzzo del rivestimento subisce gradatamente modifiche strutturali, praticamente consistenti nella riduzione dello spessore per diminuita capacità del legante solido nelle zone di continuo contatto con il liquido, o per alterazione generalizzata di qualità a causa della natura delle acque e degli elementi chimici dalle medesime portate insoluzione, con lesioni, distacchi più o meno estesi e voluminosi del calcestruzzo di rivestimento, con formazioni di sacche idriche che accentuano, con lenta ma continua opera disgregante, il processo di ammaloramento del conglomerato cementizio.

Foto 5

Foto 6

I metodi di scavo allora in uso avevano ben gravi inconvenienti, per cui, al presente, è facile rilevare, a tergo del rivestimento, abbondante legname abbandonato, che va progressivamente marcendo.
In altri punti è facile riscontrare ampi vuoti lasciati tra rivestimento e roccia, talvolta di ragguardevoli dimensioni.
La roccia così va ad assumere al contorno nuovi assetti sotto l'azione delle acque e dell'alterazione progressiva legata al nuovo contatto. Questi infatti si traducono, nella realtà pratica, nella presenza di ghiaccio all'interno della galleria nelle stagione fredde, nei distacchi di frammenti e schegge dal calcestruzzo del rivestimento e nelle mutate condizioni di sollecitazione al contorno del rivestimento stesso con possibilità di deformate di sagoma al limite della rottura a schiacciamento o torsale.
Donde la necessità di interventi urgenti per evitare spiacevoli conseguenze all'esercizio della galleria e alle stesse condizioni statiche del cavo.
Tali interventi, in generale, devono tendere essenzialmente in tre direzione:
- coinvolgere in maggior misura la roccia nella collaborazione con il rivestimento, così da aumentare il grado di competenza della roccia stessa e quinti ottenere un ampio settore naturale (arco di scarico) portante attorno al cavo.
- eseguire, nelle zone particolarmente interessate da acque percolanti, fori drenanti in modo da eliminare possibili sotto pressioni;
- riprendere il calcestruzzo del rivestimento laddove, a seguito delle risultanze di campagna delle indagine, rivela un maggior grado di ammaloramento, integrandolo con un guscio di ricopertura che garantisca, in ogni caso, la portata del rivestimento stesso.

ANALISI DELLE CAUSE DI DEGRADO DEL CALCESTRUZZO DI RIVESTIMENTO DI GALLERIE

I rivestimenti di galleria in cls, in modo particolare quelli di realizzazione non recentissima, presentano una situazione di degrado variabile ma generalmente diffusa.

Le cause di ammaloramento sono molteplici e possono essere sinteticamente divise in ambientali e di realizzazione insufficiente.

Le cause di aggressione alle strutture dovute all'ambiente possono essere formalmente suddivise in chimiche, fisiche e meccaniche.

Il meccanismo di degrado è però difficilmente ascrivibile ad una sola causa, spesso sono più fenomeni che concorrono al deterioramento delle strutture benché esista sempre quella che può definirsi la causa fondamentale che innesca il processo degradante

Le principali cause di deterioramento delle strutture in calcestruzzo possono essere sintetizzate nella seguente tabella :

CAUSE DI DEGRADO

Chimico	Fisico	Meccanico
Solfati, Solfuri	Gelo-Disgelo	Urto, scoppio
Anidride carbonoca	Ritiro	Erosione, Abrasione
Cloruri	Incendio	Sisma
Alcali	Calore di idratazione	Vibrazioni

CAUSE CHIMICHE DI DEGRADO

Attacco dei solfati

Tra gli agenti aggressivi del calcestruzzo i solfati sono indubbiamente i più pericolosi, sia per la frequenza che per le conseguenze di degrado che possono arrecare.

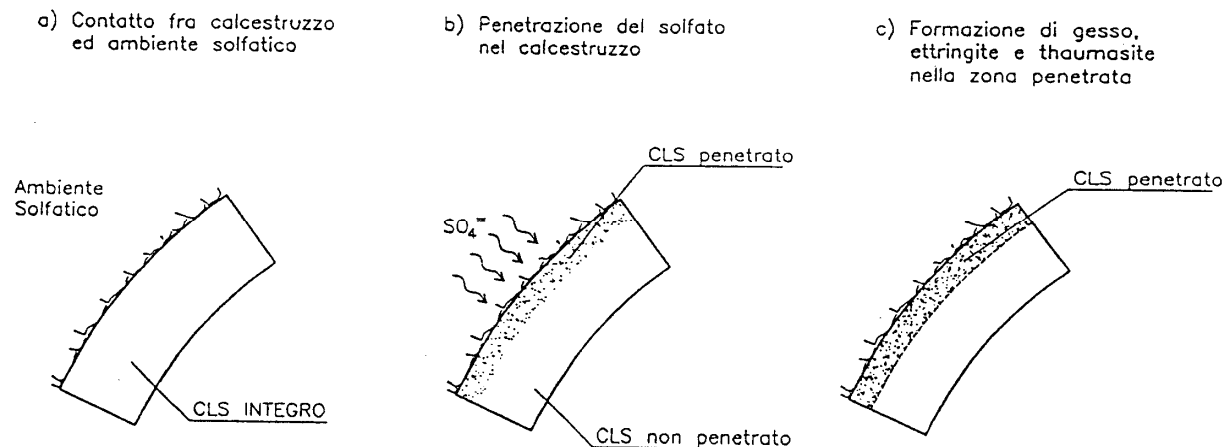
L'attacco solfatico si manifesta attraverso il rigonfiamento esagerato del conglomerato, di entità tale che possono verificarsi fessurazioni o distacchi di materiale. Tale rigonfiamento non si esplica omogeneamente in tutta la struttura , ma si localizza essenzialmente sulle zone corticali del calcestruzzo che sono a contatto con i solfati provenienti dall'ambiente estero.

Foto 1 Foto 2

Le reazioni distruttive del calcestruzzo dovute alla presenza di solfati nell'ambiente sono fondamentalmente tre :

- la formazione di gesso bi-idrato
- la formazione di ettringite
- la formazione di thaumasite

L'idrossido di calcio (Ca(OH)2- sempre presente nel calcestruzzo in quanto prodotto dalla reazione tra l'acqua di impasto ed i silicati di calcio del cemento) in presenza di solfati, viene trasformato, con aumento di volume, in gesso bi-idrato (CaSo4(2H2O)) con conseguente fessurazione e deterioramento della struttura. La formazione di thaumasite avviene in particolari condizioni ambientali : climi freddi (0-5°C), umidi (UR >95%), e ricchi di anidride carbonica (CO2). In tali condizioni l'effetto è molto devastante e decisamente più deleterio che non quello provocato dalla formazione di ettringite : la formazione dithaumasite è accompagnata dallo spappolamento del calcestruzzo che diviene un materiale incoerente mentre la formazione di ettringite dà luogo a fessurazioni e distacchi di frammenti di calcestruzzo ancora.

Duri e incoerenti.

Per eliminare i danni provocati dai solfati occorre valutare il grado di attacco solfatico e confezionare un calcestruzzo che sia capace di resistere chimicamente a tale attacco.

Per valutare il grado di attacco il criterio fondamentale è quello di misurare la concentrazione del solfato nell'ambiente, tenendo presente che maggiore è la concentrazione di solfato più severo è l'attacco e che a parità di concentrazione l'aggressione è maggiore se l'ambiente è costituito da acqua invece che da terreno.

In base alle raccomandazioni ACI per calcestruzzi resistenti ai solfati, il grado di attacco può essere definito in base alle seguenti concentrazioni previste :

:

Grado di attacco	Solfati (SO_4^{2-}) nel terreno [%]	Solfati(SO_4^{2-}) nell'acqua [ppm]
Debole	0.00-0.10	0-150
Moderato	0.10-0.20	150-1500
Severo	0.20-2.00	1500-10000
Severissimo	> 2.00	>10000

La diagnosi dell'attacco solfatico può essere effettuata, oltre che dall'esame visivo dello stato della struttura, con una semplice analisi chimica quantitativa del contenuto di solfati nel calcestruzzo Normalmente nelle strutture in calcestruzzo è sempre presente una certa quantità di solfato, conseguente alla presenza di solfato di calcio nel cemento come regolatore di presa. Tale contenuto fisiologico varia fra 0,4% e 0,6% rispetto al peso del calcestruzzo.
Se dall'analisi chimica risulta che il contenuto di solfati nel calcestruzzo è decisamente superiore allo 0,6% del peso è sintomo di un attacco solfatico in corso.

Attacco dei solfuri
Il solfuro (S2-) può essere presente in natura nei terreni e nelle acque di falda e può presentarsi sotto forma di sale (es. FeS2) o come acido (es. H2S).
Il solfuro non sembra avere un'azione aggressiva diretta nei confronti del calcestruzzo, tuttavia la sua trasformazione in altri composti, quali formazione di acidi, può provocare il deterioramento del calcestruzzo.
L'attacco dei solfuri è molto più raro di quello dei solfati e si presenta prevalentemente in due situazioni ambientali particolari : terreni argillosi ricchi di pirite e talune acque di scarico di fognature.
I principali effetti di questo tipo di attacco risultano essere l'asportazione del cemento e la messa a nudo degli inerti.
L'attacco sembra sia meno aggressivo nei confronti dei calcestruzzi ben compattati e densi, mentre il tipo di cemento impiegato non modifica sostanzialmente la resistenza del conglomerato.
Attacco dell'anidride carbonica
I meccanismi di aggressione da parte dell'anidride carbonica nei confronti di strutture in calcestruzzo sono differenti a seconda se si considerano opere di tipo idraulico, esposte a delle acque ricche di anidride carbonica (dilavamento), o a strutture armate esposte all'aria ricca di tale gas (carbonatazione del calcestruzzo e corrosione dei ferri d'armatura).

Dilavamento del calcestruzzo
Il problema del dilavamento di strutture in calcestruzzo riguarda essenzialmente strutture di tipo idraulico esposte all'azione di acque relativamente pure ed in movimento.
Tutte le acque naturali contengono una certa quantità di anidride carbonica (CO2) e può essere presente sotto forma di acido carbonico (anidride carbonica libera) oppure sotto forma di sali carbonati (anidride carbonica combinata).
L'anidride carbonica presente nell'acqua può reagire con il carbonato di calcio normalmente presente nella pasta di cemento o nel calcestruzzo e quindi esercitare un'azione di degrado della struttura.
Se l'acqua risulta relativamente ricca di CO2 libera (aggressiva) tenderà a disciogliere nell'acqua il carbonato di calcio avviando il fenomeno del dilavamento.

Se, al contrario, l’acqua risulta relativamente povera di CO_2 libera, la reazione fra anidride carbonica e carbonato di calcio tende a formare $CaCO_3$ solido a spese del bicarbonato disciolto nell’acqua. L’acqua risulterà in tal caso incrostante in quanto tenderà a formare incrostazioni e depositi.

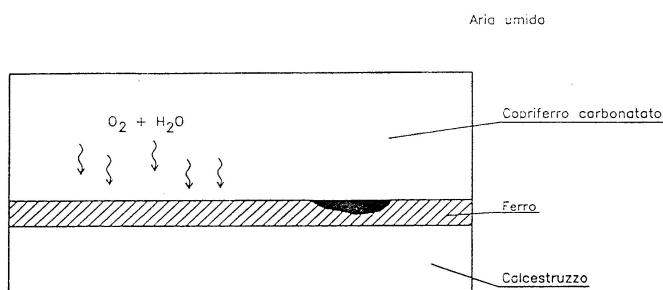
Carbonatazione del calcestruzzo
L’azione dell’anidride carbonica dell’aria nei confronti del calcestruzzo consiste essenzialmente nella neutralizzazione della calce presente nell’impasto con conseguente abbassamento della basicità dell’ambiente.

L’abbassamento del PH (solitamente da 13 a 11) avviene nelle zone corticali della struttura per poi estendersi successivamente a quelle più interne.
La carbonatazione, a differenza del dilavamento, non deteriora il calcestruzzo, ma rende i ferri di armatura più vulnerabili all’azione corrosiva. L’ossigeno e l’umidità ambientale sono in grado di corrodere le armature se queste non sono protette dal calcestruzzo basico.
Il fenomeno è sostanzialmente legato all’impiego di un calcestruzzo poroso e permeabile per effetto di un elevato rapporto di acqua/cemento. Nei calcestruzzi di media qualità e con rapporti acqua/cementi inferiori a 0,60 esso è praticamente assente.
La degradazione dell’armatura consiste nella trasformazione chimica, in presenza di ossigeno e umidità, da ferro metallico (Fe) a ossidi o idrossidi di ferro (ruggine).

Foto 3

Foto 4

La corrosione dei ferri di armatura presenta sostanzialmente due fenomeni degradanti :
la diminuzione delle sezione di ferro metallico;
il distacco del copriferro a causa del rigonfiamento delle armature per la trasformazione del metallo in ossido.
L’espulsione del copriferro provoca una completa esposizione dei ferri all’azione aggressiva ed il fenomeno del degrado viene pertanto accelerato.
Per evidenziare la presenza in atto del fenomeno della “carbonatazione” si può ricorrere ad un test colorimetrico con soluzione acquosa di fenolftaleina.

La demarcazione fra le zone colorate in modo differente indica, rispetto alla superficie esposta all'aria, lo spessore di calcestruzzo che risulta carbonato e quindi non più capace di proteggere i ferri dalla corrosione.

SCHEMATIZZAZIONE DELLA CORROSIONE DEI FERRI DI ARMATURA

La corrosione dei ferri può avvenire solo se il copriferro in calcestruzzo è inadeguato per spessore e/o qualità. Un copriferro di spessore ridotto e/o poroso consente l'ingresso della CO2 dell'aria e, di conseguenza la neutralizzazione completa della calce e, in fasi successive ma non simultanee, l'ingresso dell'ossigeno e dell'acqua.
Ai fini pratici, per evitare la penetrazione degli elementi che alimentano la corrosione del ferro, è necessario che il copriferro, oltre che essere poco poroso e di spessore adeguato, risulti privo di fessure attraverso le quali la penetrazione degli agenti ossidanti risulterebbe agevolata. E' quindi importante ridurre le fessure che si formano per ritiro plastico durante la fase di maturazione.

L'azione del cloruro
Il cloruro è presente in natura nell'acqua del mare o artificialmente nei sali disgelanti per rimuovere il ghiaccio. Le strutture che possono essere soggette all'azione di degrado prodotta dal cloruro risultano quindi le strutture marine e tutte le opere stradali, autostradali, aeroportuali e le pavimentazioni in genere.
Per queste ultime l'azione aggressiva nei riguardi dei ferri di armatura e del calcestruzzo possono essere riassunte dalla seguente tabella :

Classificazione del degrado provocato dai sali disgelanti

	Sali disgelanti a base di:	
	NaCl	$CaCl_2$
Ferro di armatura	Corrosione localizzata (pitting)	Corrosione localizzata (pitting)
Calcestruzzo	Fessurazione per reazione alcali-aggregati (solo con inerti reattivi)	Fessurazione per formazione di ossicloruro

Anche la diagnosi dell'attacco dei cloruri può essere eseguita attraverso una semplice analisi chimica quantitativa.

Si possono inoltre effettuare altre due prove di notevole interesse nella determinazione del grado di attacco dei cloruri :
- prova colorimetrica alla fluorescina;
- analisi per diffrazione dei raggi X.
La prova colorimetrica alla fluorescina consiste nello spruzzare su una carota di calcestruzzo una soluzione a base di fluorescina ed una a base di nitrato d'argento.
In base alla colorazione che assumerà il calcestruzzo è possibile determinare il fronte d'avanzamento del cloruro attraverso il copriferro e stabilire quindi lo spessore di calcestruzzo che deve essere rimosso per impedire che la corrosione dei ferri possa proseguire.
L'analisi per diffrazione ai raggi X, su un campione di calcestruzzo prelevato dalla struttura indagata, consente di evidenziare l'eventuale formazione di ossicloruro responsabile del severo degrado del calcestruzzo esposto al trattamento dei sali disgelanti.
Nel caso venga accertato questo degrado, è necessario che il materiale da impiegare per il successivo ripristino sia accuratamente scelto in vista di un possibile nuovo degrado.

Corrosione dei ferri per azione dei cloruri
Il fenomeno corrosivo delle armature legato alla presenza di cloruri si esplica mediante un'azione incisiva e localizzata (pitting) che consiste nella rimozione dello strato di ossido ferrico compatto e protettivo (passivante) che in presenza di cloruri diviene incoerente e consente l'ulteriore ossidazione del metallo.
Nel caso di strutture in calcestruzzo per opere stradali ed autostradali la presenza di cloruri è determinata dalla necessità, durante la stagione invernale, di spargere sul manto stradale dei sali decongelanti. In queste condizioni la penetrazione del cloruro dall'ambiente verso i ferri di armatura può essere accelerata dalla disintegrazione del copriferro a causa dei cicli di gelo e disgelo.

Reazione alcali-aggregati
Il cloruro di sodio è in grado di innescare la cosiddetta reazione alcali-aggregati ed è generalmente associata alla presenza di alcali (sodio e potassio) nel cemento e di silice amorfa o scarsamente cristallina presente in alcuni aggregati.
La reazione alcali-aggregati comporta un rigonfiamento localizzato degli aggregati reattivi che si manifesta nel tempo con fessurazioni di forma irregolare dalle quali fuoriesce un liquido gelatinoso e biancastro (silicato sodico),
Alla fessurazione segue solitamente il distacco superficiale del calcestruzzo .
La presenza di cloruro di sodio in un ambiente umido può provocare un grave peggioramento dello stato del materiale.

Azione del cloruro di calcio sul calcestruzzo
Anche il cloruro di calcio, al pari del cloruro di sodio, oltre a provocare la corrosione dei ferri di armatura è in grado di danneggiare gravemente il calcestruzzo.
Il calcestruzzo a contatto con il cloruro di calcio tende a fessurarsi e delaminarsi a causa della disintegrazione della pasta di cemento, più specificatamente sul Ca(OH)2 in essa contenuto, per formare ossicloruro di calcio idrato.

CAUSE FISICHE DI DEGRADO

Le cause fisiche di degrado delle strutture in calcestruzzo sono imputabili essenzialmente a due fenomeni variazione temperatura; variazione umidità relativa.
Le variazioni di temperatura che possono sorgere all’interno di una struttura in calcestruzzo sono di natura diversa :
- variazioni termiche naturali (es. gelo-disgelo);
- variazioni termiche artificiali (incendio);
- variazioni termiche per effetto di calore di idratazione.

Le variazioni di umidità relativa (U.R.) possono generare uno stato tensionale nel calcestruzzo attraverso l’insorgere di variazioni dimensionali.
Se tali tensioni provocano delle fessure nel calcestruzzo si può innescare un processo di degrado delle strutture anche se la composizione del calcestruzzo è potenzialmente adeguata ad assicurare la durabilità del materiale.

Ciclo gelo-disgelo

Il calcestruzzo è costituito da elementi (pasta di cemento e aggregati) che presentano coefficienti di dilatazione termica diversi. La pasta di cemento presenta un coefficiente di dilatazione termica pari a 9.5x10-6 °C-1, mentre gli aggregati presentano valori che possono variare da 11x10-6°C-1 se silicei, a 5x10-6°C-1 se calcarei.
Una variazione di temperatura, ad esempio fra 10°C e 40°C, induce quindi uno stato di sollecitazione nell’interfaccia pasta-aggregato, soprattutto per impasti con aggregati calcarei.
Tali sollecitazioni sono comunque trascurabili rispetto a quelle indotte da variazioni cicliche di temperatura intorno a 0°C in calcestruzzi saturi d’acqua. Infatti quando l’acqua congela il suo volume aumenta di circa il 9% ed è in grado di provocare una pressione capace di distruggere progressivamente il calcestruzzo, soprattutto se il fenomeno si ripete ciclicamente, per effetto di una tipica rottura a fatica.
L’azione alternata dei cicli di gelo e disgelo può provocare danni molto gravi nelle strutture di opere marittime, idrauliche ed autostradali situate in climi molto rigidi.
Il fenomeno di degrado si manifesta sotto forma di fessurazioni, sfaldamento e distacchi superficiali.
Affinché si manifesti il degrado è necessario che il grado di saturazione superi il 91,7%. In queste condizioni l’aumento di volume dell’acqua provocato dal congelamento non è più in grado di essere contenuto all’interno dei pori non ancora saturi d’acqua.
L’esperienza ormai consolidata sulle strutture in calcestruzzo esposte all’azione dei cicli di gelo e disgelo, ha evidenziato che la durabilità di queste opere è legata al rispetto dei seguenti principi :
- inglobare aria nel calcestruzzo mediante additivi aeranti;
- impiegare aggregati non gelivi;
- ridurre il rapporto acqua/cemento.

Incendio

Come già accennato in precedenza, la pasta di cemento possiede un coefficiente di dilatazione termica leggermente diverso da quello degli aggregati. Inoltre, quando la temperatura sale oltre i 100-150°C la pasta di cemento, dopo la dilatazione iniziale, subisce una significativa contrazione per effetto della decomposizione termica dei suoi composti idrati.
La conseguenza di tale situazione è la formazione di microfessure lungo l’interfaccia pasta-aggregato.

Se l'azione del fuoco è prolungata e la temperatura del calcestruzzo raggiunge i 573°C gli aggregati silicei subiscono una dilatazione improvvisa a causa del passaggio da una forma al quarzo () ad un'altra().
Questa transizione di fase spesso causa il repentino distacco del copriferro e la diretta esposizione dei ferri di armatura. Parallelamente si ha una brusca caduta di resistenza del calcestruzzo che si riduce ad un quarto di quella iniziale.
Da un punto di vista pratico, nel caso di incendio, il calcestruzzo ha il ruolo fondamentale di proteggere i ferri di armatura. E necessario assicurare un adeguato spessore al copriferro al fine di proteggere per un tempo suffigientemente lungo le armature dal raggiungimento di temperature superiore ai 500°C.
Tempo di raggiungimento della temperatura di 500°C nelle armature in funzione del copriferro e del tipo di aggregati utilizzati :

Spessore copriferro	aggregati silicei	aggregati calcarei
2 cm	50'	70'
3 cm	80'	110'
4 cm	120'	160'
5 cm	180'	240'

Spesso però negli elementi in calcestruzzo armato l'acciaio è protetto da copriferro di spessore variabile ed in alcune zone costituito da calcestruzzo non omogeneo e mal compattato.
Questi punti deboli, in caso di incendio, possono diventare dei canali preferenziali per il flusso termico che può far innalzare la temperatura dell'acciaio oltre i 500°C in tempo brevissimo.
Inoltre, data l'elevata conducibilità termica dell'acciaio, il flusso termico è rapidamente trasferito lungo l'armatura che tende a dilatarsi, contrastata dal calcestruzzo ancora a temperatura inferiore.
Quando le tensioni indotte dalla dilatazione termica superano la capacità di aderenza ferro-calcestruzzo, si verifica la caduta di solidarizzazione tra acciaio e calcestruzzo con conseguente sfilamento dei ferri e distacco di parti di copriferro.

Fessure da ritiro plastico.
Si intende per ritiro plastico il cambiamento di volume del calcestruzzo a seguito di variazioni igrometriche che si manifestano quando il calcestruzzo è ancora allo stato plastico.
Le fessure per ritiro plastico si formano generalmente lungo le superfici di getti di calcestruzzi non casserati ed esposte direttamente ad ambienti asciutti.
La prevenzione del fenomeno può essere effettuata essenzialmente :
- la prevenzione dell'evaporazione dell'acqua interponendo una barriera fra calcestruzzo e ambiente;
- umidificare con acqua la superficie finita non casserata.
Fessure da ritiro igrometrico
Il ritiro del calcestruzzo allo stato indurito coinvolge le strutture per un lungo periodo di tempo. Tuttavia i 3/4 del ritiro si manifestano entro i primi 6 mesi dal getto.

A differenza del ritiro plastico, il ritiro igrometrico può essere solo ridotto adottando calcestruzzi con un rapporto acqua/cemento basso ed un aumento del rapporto aggregato/cemento.
In casi particolari (restauro di strutture degradate, ancoraggi di macchinari, ...) si possono utilizzare calcestruzzi e malte a ritiro compensato nei quali vengono inseriti prodotti ad espansione controllata che producono delle sollecitazioni opposte a quelle indotte dal ritiro.

CAUSE DA REALIZZAZIONE INSUFFICIENTE
Carenze progettuali.
Tra le cause di degrado dei rivestimenti di galleria in calcestruzzo non devono essere dimenticate anche carenze di realizzazione che possono essere largamente giustificate, in quanto sia in fase progettuale che costruttiva specifici problemi localizzati possono non essere evidenti oppure crearsi in seguito alle modificazioni introdotte con la realizzazione stessa.
Tra le più frequenti carenze progettuali si ritrovano :
- Errata valutazione della interazione terreno – struttura;
- Errata valutazione della circolazione idrica;
- Mancanza di impermeabilizzazione.
Carenze costruttive
Analogamente si riscontrano frequentemente le seguenti carenze costruttive :
- Presenza di vuoti al contatto del rivestimento;
- Scarsa qualità del calcestruzzo;
- Difetto di impermeabilizzazione.

Il Progetto COVERtun, "Ideato da Mirafiori Natale"fu pubblicato la prima volta sulla Rivista LE STRADE nel 1995. La prima ad adottarlo fu la Società Autostradale SAVONA – TORINO con intervento conservativo di due piccole Gallerie per una lunghezza totale di circa 131 m. Il lavoro fu eseguito in sessanta giorni consecutivi, senza deviazione del traffico che venne incanalato nella corsia centrale della carreggiata. "Come potrete verificare più avanti."

NUOVE COSTRUZIONE DELL’ANELLO DI RIVESTIMENTO

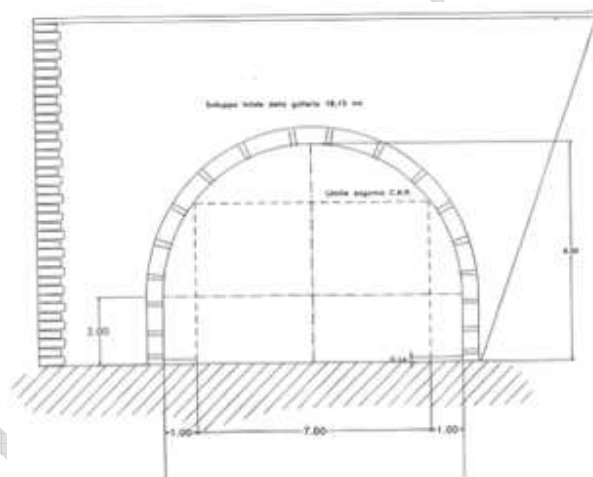
La nuova costruzione dell’anello di rivestimento dopo la scarifica può avvenire in vari modi dipende del tipo di progetto della profondità della scarifica se bisogna ricostruire e rafforzare meccanicamente la struttura della galleria. Noi esaminiamo tre tipologie diverse tra loro ma tutti con lo stesso fine quella di migliorare la struttura e la sicurezza nella galleria.

1) Intervento per la realizzazione del rivestimento strutturale di gallerie stradali ammalorate si sviluppa in fasi successivo garantendo comunque la percorribilità sostanziale, sia pure un'unica corsia, della strada interessata.

La garanzia della percorribilità, soprattutto su strade di collegamento attraverso valli isolate, è indispensabile per mantenere il collegamento con centri abitati che altrimenti rimarrebbero isolati per tutto il periodo di esecuzione dei lavori, analogamente nel caso di gallerie autostradali, il mantenimento della percorribilità su una corsia evita la necessità di incorrere a scambi di carreggiata che come si sa sono spesso fonte di pericolo e causa di incidenti.

FASE DI INTERVENTO

Scavo dei cordoli

La prima fase di intervento è costituita dallo scavo dei cordoli laterali al piede dei piedritti, inizialmente si procede al taglio della pavimentazione mediante l'uso di frese puntuali che garantiscono la realizzazione di un taglio netto e di una superficie lineare necessaria per una successiva fase di ripristino della pavimentazione.

Sezione Fig. 17

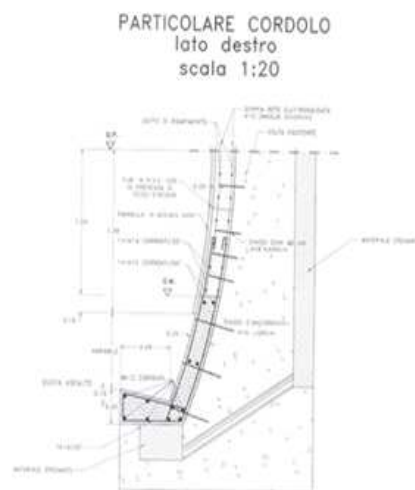
Una volta effettuato il taglio della pavimentazione, con l'ausilio di una terna si procede allo scavo con conseguente rimozione del sottofondo stradale per una lunghezza di circa 1 m e una profondità variabile a seconda dei casi e dipendente anche dalla necessità o meno di realizzare uno strato di materiale drenante o di ripristinare quello esistente, necessario per lo smaltimento delle acque raccolte dal drenaggio a tergo del rivestimento. In questa fase è necessario procedere alternativamente sul lato destro e sul lato sinistro della strada spostando di volta in volta il transito veicolare sul lato opposto.

PARTICOLARE CORDOLO
lato destro
scala 1:20

Fig. 18 Fig. 19

Cordoli al piede e prima fase di getto.

Dopo avere effettuato un getto di regolarizzazione del fondo scavo con calcestruzzo, si procede alla posa del ferro di armatura ed alla realizzazione del cordolo in calcestruzzo (generalmente con cls di classe 30 Mpa con resistenze adeguate) necessario sia per consentire il passaggio del carro portaforme che si utilizzerà successivamente, sia, e soprattutto, per costituire un blocco di ancoraggio, eventualmente legato al paramento esistente con chiodi inghisati nel paremento esistente.

Immediatamente dopo il getto del cordolo al piede, si realizzerà un primo getto di rivestimento della galleria per una altezza di circa 100-130 cm; tale getto costituirà la base di appoggio e di partenza del posizionamento del carro per il nuovo getto del coronamento della galleria. Questa prima sezione di rivestimento verrà ancorata alla parete, a seconda dello stato di conservazione del calcestruzzo esistente o addirittura se la galleria risulta essere non rivestita o rivestita in laterizio, le chiodature di ancoraggio dovranno essere sufficientemente profonde da garantire la tenuta dell'ancoraggio.

SCHEMA VOLTA IN PROGETTO
scala 1:75

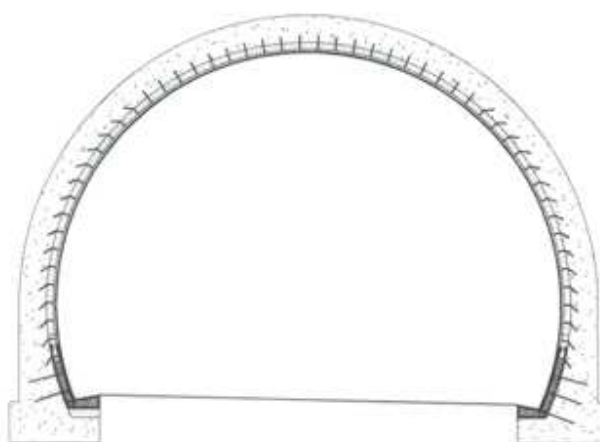
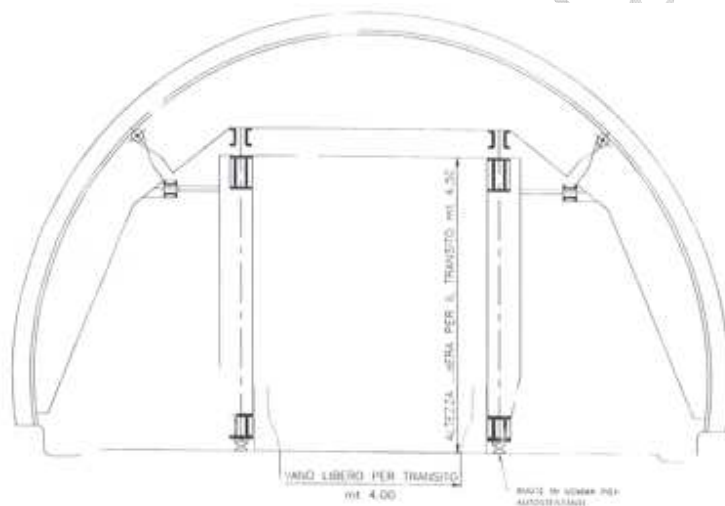



Fig. 20

Con l'utilizzo di un trabattello dotato di ponti posizionati a varie altezze, si procede alla realizzazione dei fori in cui verranno inghisati dei ganci e/o barre di acciaio sulla struttura della galleria in calcestruzzo con resine o malte tixtropiche per ancoraggio della rete a sostegno del nuovo getto; la profondità dei fori dipenderà come sempre dallo stato del paramento.
Generalmente si effettuano fori di 20 - 40 cm in modo da garantire collegamento continuo del nuovo strato di rivestimento in calcestruzzo con l'intradosso della galleria.
Nel caso di doppia maglia di rete, la prima verrà appoggiata ad una distanza di circa 3-4 cm dal paramento e a questo fissata ai ganci appositamente predisposti la seconda invece sarà fissata a circa 7-9 cm dalla precedente e fissata ai ganci sopra menzionati. Una particolare cura deve essere rivolta nel garantire uno strato di copriferro di almeno 5 cm

Carro portaforme
Un carro portaforme mobile con cerniere per rotazione della parte dei piedritti, costituito da un portale in profili di acciaio centinati montato su ruote in gomma, deve essere realizzato in modo consentire il mantenimento di un franco libero per il traffico di m 5,00 in altezza e di m 4,50 larghezza.

Carro portaforme Fig. 21

Con vitone di sblocco cassero, e cilindri idraulici per armo e disarmo calotta e piedritto che consentono gli spostamenti laterali necessari per un perfetto allineamento della casseratura al paramento esistente; (tale flessibilità si dimostra indispensabile soprattutto in considerazione del fatto che nella maggior parte delle esistenti gallerie in oggetto di manutenzione si verifica la non perfetta aderenza ai progetti delle opere da realizzare) di lunghezza che possono variare secondo le difficoltà da 6- a 10 m di progetto che devono comprendente dei piani di lavoro per l’esecuzione ed il controllo dei getti e che consente altresì il traffico stradale o autostradale sulla corsia centrale.

Operazione di getto
Il getto viene eseguito mediante l'uso di una pompa carrellata o di autopompe normale da cantiere che, se la lunghezza e limitata (6 m) può essere fissata direttamente al caro , viene posizionata in chiave di calotta con una tubazione fissa ancorata al carro.

La pompa carrellata, e di conseguenza l'autobetoniera che la alimenta vengono piazzate da una parte della galleria a distanza sufficiente dal carro a portale- per consentire il transito agevole agli automezzi.
In fase di getto si dovrà assicurare una particolare attenzione alla distribuzione del calcestruzzo sui due paramenti in modo da mantenere assolutamente lo stesso livello di calcestruzzo, tale accorgimento è necessario per evitare sbilanciamenti nelle sollecitazioni indotte dal calcestruzzo fresco.
Attenzione particolare deve essere posta nel riguardo del confezionamento del calcestruzzo tanto più se detti getti si eseguiti nei mesi invernali, deve essere posta quinti una attenzione particolare allo sviluppo delle resistenze con classe di resistenza Rck >= 30 Mpa Le resistenze richieste per eseguire gli scasseraggi in breve (almeno 10,0 Mpa) per poter raggiungere alle breve stagionature all'impasto n°4 (a 24 ore bisogna ottenuto 26,4 Mpa) per ogni getto devono essere confezionati almeno n° 8 cubi di dimensione 15X15X15 cm

I risultati ottimali sono:

	1 giorno (Mpa)	2 giorni (Mpa)	7 giorni (Mpa)	28 giorno Mpa)
Prova	26,4	39,2	52,1	59,3

Al momento del prelievo i dati rilevati devono essere i seguenti:
Slump: 18 cm Temperatura: 6° C con l'utilizzo di cemento di classe 52,5 tipo 1
Inoltre si deve tener conto di fare integrare il più possibile il calcestruzzo vecchi con il nuovo cercando di ottenere un corpo unico più omogeneo possibile.

Operazioni di disarmo
Utilizzando questo tipo di calcestruzzo ed osservando un controllo sistematico della relativa maturazione può consentito il disarmo mediamente a circa 24 ore dal getto per lo spostamento rapido sul concio successivo.

2) Intervento
Realizzazione dei due cordoli e di n°15 tiranti di collegamento in c.a., vedi tavole n°3 e n°4 (con esecuzione di scavi e getti "a campioni", come schematizzato in fig. n° 1).
Risagomatura del rivestimento esistente.
Gli interventi di cui ai punti n°1 e n°3, opportunamente dosati, permettono la realizzazione del nuovo anello in c.a. dello spessore di cm 20, rispettando i franchi in altezza, e dei nuovi marciapiedi che, per consentire la rettilinearità dell'asse e la costanza della larghezza della carreggiata, risultano a larghezza variabile, nonché del rivestimento in cls.
Impermeabilizzazione con pannelli di materiale tipo "BENTOTEC" (bentonite secca confinata da due fogli di cartone lentamente solubile in presenza di acqua) fissato alla superficie della vecchio rivestimento, risultante dopo la demolizione di cui al punto n°3, opportunamente giuntati e convoglianti le acque in canalette longitudinali in PVC che restano conglobate alla base del nuovo getto.
Per il getto dello anello in c.a. (doppia rete in acciaio elettrosaldato mm. maglia 15 cm.) è stato previsto, come cassaforma a perdere, un rivestimento strutturale autoportante e

collaborante composto da elementi in acciaio inox AISI 304 finitura 2 B, spessore 8/10 mm., grecati e centinati tipo HV 3510/6 fissato al calcestruzzo esistente mediante tasselli 12 in acciaio inox con opportuni distanziatori. Lo stesso rivestimento in acciaio inox grecato è previsto per i frontali esterni del rivestimento (esistente e di nuova costruzione.
Stante la necessità di operare in presenza di traffico, tutti i lavori descritti interesseranno prima una metà del piano stradale, poi l'altra: a tal fine sono stati studiati, sia per il getto del rivestimento che per il getto dei tiranti di fondazione, le opportune sovrapposizioni delle armature.

3) Intervento con malte reoplastiche premiscelate di spessore 4 – 5 cm
Negli ultimi anni si e intervenuti più volte su calcestruzzi di gallerie seriamente degradati o comunque le cui prestazioni funzionali e strutturali non rispondevano più alle esigenze originarie.
Nel recupero e/o consolidamento in molti casi la scelta dei materiali per rivestimento, si è previsto l'impiego di malta reoplastica premiscelate spruzzata.
La malta reoplastica è un conglomerato cementizio ottenuto aggiungendo ad una miscela di inerti accuratamente selezionata e dosata un cemento speciale ad alta resistenza, caratterizzata dalla presenza di additivi superfluidificanti ed acceleranti.
Il risultato è la realizzazione di un impasto dotato di alta lavorabilità con n rapporto acqua-cemento estremamente basso, esente da fenomeni di segregazione e di "bleeding" e pertanto più o meno affidabile.
Già con brevissimi tempi di stagionatura, la malta possiede le caratteristiche derivanti dal basso rapporto acqua-cemento: alta resistenza, impermeabilità, durevolezza, omogeneità, con assenza di vespai.
La principale caratteristica è comunque quella di presentare, in fase di presa e di indurimento, un effetto leggermente espansivo e quindi di eliminare i fenomeni di microfessurazione dovuti al ritiro.

VERIFICA STATICA
La funzione statica della "fodera" di malta reoplastica è quella di sostenere possibili sovraccarichi localizzati dovuti ai distacco di placche di calcestruzzo ammalorato del vecchio rivestimento.
Un calcolo viene condotto simulando il comportamento tridimensionale della struttura di rinforzo schematizzata come una volta sottile condizionata, nelle deformazioni, dall'interazione con la calotta preesistente, e caricata dal peso proprio e da un carico convenzionale unitario spalmato su un'area di circa 1 m2.
Successivamente si può valutato il coefficiente di moltiplicazione di tale carico che porta al limite di fessurazione la struttura di rinforzo.
In particolare si può prendere in esame una tratta di 10 m di galleria che viene schematizzata con un modello ad elementi finiti costituito da circa 231 nodi a sei gradi di libertà e da 200 elementi tipo "shell", caratterizzati cioè contemporaneamente da un comportamento tensionale a membrana ed a piastra.
Il modello così descritto può permette infatti di descrivere esaurientemente il comportamento della struttura nelle ipotesi di carico indicate ed in particolare può consentire:
a – di simulare il comportamento membranale tridimensionale d'insieme della "fodera" senza trascurare gli effetti flettenti dei carichi localizzati;
b – di schemattizzare semplicemente l'interazione fra la vecchia e la nuova struttura mediante l'imposizione di una congruenza geometrica;

c – di applicare correttamente un carico che simuli il distacco di una placca di calcestruzzo di una zona sufficientemente localizzata del vecchio rivestimento.
Comunque a semplice scopo orientativo si può riportare la deformata della struttura dovuta al peso proprio ed in assenza di vincoli di congruenza.
Il carico accidentale convenzionale può essere schematizzato mediante l'applicazione di una pressione uniforme verticale di 1.0 t/m2 agente sull'elemento 95 in corrispondenza della sezione di chiave della volta; dall'esame delle deformate del rivestimento di rinforzo per solo peso proprio tale sezione può risultare infatti di essere quella maggiormente sollecitata dalla combinazione dei carichi agenti.
I risultati dei calcoli ottenuti, in corrispondenza dei nodi più sollecitati, con le tensioni si possono riportare in una apposita tabella.
Comunque sia non è mai come costruire un nuovo anello in calcestruzzo anche se di spessore di 12 – 15 cm.

INTERVENTI NELLE GALLERIE VOLTE E VAPEA "L'intervento è stato eseguito con il progetto COVERtun ideato da Mirafiori Natale:"

Stato di fatto e valutazioni progettuali.
Le gallerie in oggetto ubicate in carreggiata Sud tra le stazioni di Altare e Savona, hanno andamento planimetrico curvilineo ed andamento altimetrico in discesa verso Savona; sviluppano rispettivamente in asse ml 35 e ml 92. I raggi di curvatura sono, per la galleria VOLTE r = 150 m. e per la galleria VAPEA r =210m.

Stato di fatto.
Si tratta di due gallerie della corsia TO-SV, la prima di ml. 35 e la seconda di ml. 92.
Effettuato un sopralluogo per stabilire le condizioni delle gallerie e gli eventuali interventi di rinforzo del rivestimento, si è riscontrato:

Foto 1 Foto 2

In galleria VOLTE una serie di tre lesioni del rivestimento della calotta, in cui in precedenza sono avvenuti distacchi di calcestruzzo e che ora risultano tamponate, una con muratura in mattoni e le altre due con lamiera metallica mantenuta in posizione da spezzoni di profilato a C chiodato al calcestruzzo (vedi fotografie 3 e 4).

Foto 3

Foto 4

Il rivestimento presenta inoltre lesioni lungo le riprese di getto dei conci (vedi fotografie 3 - 5 - 6), da cui sono evidenti possibili distacchi di cunei di calcestruzzo.

Foto 5

Foto 6

Lungo le citate lesioni e attraverso il calcestruzzo ammalorato esistono diffuse infiltrazioni di acqua di percolazione (es. foto 7).

Foto 7

Similmente nella galleria VAPEA si riscontrano sia due lesioni nel rivestimento di calotta, anch'esse tamponate con lamiera metallica e spessori di profilato chiodato al calcestruzzo

(vedi foto 3), sia le lesioni lungo la ripresa dei getti dei conci, sia le infiltrazioni attraverso le lesioni e attraverso il calcestruzzo ammalorato (vedi foto 3-4-5)

Foto 1

Foto 2

Foto 3

Foto 4

In entrambe le gallerie il rilievo topografico di precisione non ha evidenziato alcuna traslazione dei conci, bensì una realizzazione del rivestimento alquanto irregolare rispetto alla geometria teorica della galleria.

Foto 5

I portali e le velette presentano consistenti distacchi del copriferro, fatto che avvalora l'ipotesi che le cause principali dell'ammaloramento e della disgregazione del calcestruzzo

debbano essere ricondotte all'azione di gelo e disgelo abbinata alla presenza di acqua di percolazione con presenza di cloruri.
Un'analisi approssimativa delle sollecitazioni a cui è sottoposto il rivestimento, ha evidenziato che la zona di calotta interessata dalle lesioni è sottoposta ad uno stato tensionale eccessivo che avrebbe richiesto la presenza di armatura metallica.

Valutazioni Progettuali
Per entrambe le gallerie si è valutato di prevedere il rivestimento di impermeabilizzazione, integrato da uno spessore di calcestruzzo a tergo, con funzione di rinforzo strutturale.
Il rilievo topografico mostra, come già detto, una realizzazione irregolare dei calcestruzzi, per cui sono stati calcolati dei raggi di curvatura che consentano alla sagoma del nuovo rivestimento di passare con spessori il più possibile omogenei (spessore medio di 22 cm)
Dalle ispezioni di controllo periodico effettuate da personale specializzato, per stabilire le condizioni dello stato delle gallerie era emersa in sintesi la situazione seguente molto similare tra i due fornici:

Foto 1

Foto 2

la presenza nel rivestimento della calotta di degrado degli strati superficiali di calcestruzzo ed una serie preoccupante di vespai e lesioni ramificate profonde, intersecate, diversamente orientate, anche di grande apertura, presso cui in alcuni punti in passato si erano generati distacchi di porzioni di calcestruzzo di varie dimensioni, successivamente tamponate con protezioni provvisorie talora costituite da fogli di lamiera ancorati con tassellature; la presenza in alcune zone della chiave di calotta di blocchi di calcestruzzo del rivestimento lesionate al contorno: in particolare nella galleria Volte un fornello manifestatosi probabilmente già poco tempo dopo la costruzione era stato fin d'allora rimosso e tamponato con muratura in mattoni che ormai risultavano in fase di degrado. Altri blocchi, rimasti in calotta, erano stati rimessi in sicurezza con interventi provvisori, mediante fasci di putrelle chiodate al rivestimento fino al momento dell'intervento in oggetto.

Foto 3

Foto 5

La presenza lungo le citate lesioni, lungo i giunti d'anello, e attraverso il calcestruzzo ammalorato, di diffuse infiltrazioni di acqua con copiose percolazioni lungo i piedritti e stillicidi sul piano stradale sottostante.
In entrambe le gallerie il rilievo topografico ha evidenziato una realizzazione del rivestimento originario alquanto irregolare rispetto alla geometria teorica della galleria, con numerosi punti caratterizzati da profili e curvature fuori sagoma.
Un'analisi approssimata delle sollecitazioni a cui era sottoposto il rivestimento, ha evidenziato che le zone di calotta interessate dalle lesioni erano sottoposte ad uno stato tensionale eccessivo che avrebbe reso opportuna la presenza di armatura metallica.

INTRODUZIONE

Nella presente relazione è stato analizzato l'effetto dei nuovi interventi di rinforzo previsti per le gallerie Volte e Vapea.
Per valutare il miglioramento apportato dalle strutture di rinforzo alla statica della galleria è stata condotta un'analisi agli elementi finiti per riprodurre le caratteristiche di sollecitazioni a cui presumibilmente risulta soggetta l'opera.
Non avendo a disposizione i calcoli statici di progetto, si è ipotizzato, come condizione peggiore, un carico gravante sulla galleria pari al peso del terreno di ricoprimento, assunto con caratteristiche geotecniche medie per materiali analoghi, ed una condizione di spinta laterale prossima al valore di spinta a riposo K o. Inoltre, sono stati considerati gli effetti asimmetrici della spinta conseguente all'inclinazione del versante interessato dall'opera.
Attraverso queste elaborazioni numeriche si sono determinate le sollecitazioni nelle strutture originarie e conseguentemente si sono calcolate le tensioni massime presenti nella struttura esistente.
La realizzazione della struttura di rinforzo ha il compito statico di aumentare la sicurezza locale della sezione e quindi di modificare la sicurezza totale dell'opera nel suo complesso.
Per valutare tale effetto si sono confrontate le sollecitazioni teoriche previste con le riserve di resistenza che le sezioni offrono sia senza, che con intervento di rinforzo
Nelle verifiche delle sezioni si è ipotizzata una perfetta aderenza fra la vecchia struttura e la nuova. Tale ipotesi è garantita dalle chiodature previste che consentono la trasmissione delle forze di scorrimento fra le due parti strutturali che vengono chiamate a collaborare congiuntamente.

Si è inoltre ipotizzato che lo stato di sollecitazione non vari sostanzialmente per la presenza del nuovo intervento di rinforzo e che le operazioni di costruzione dello stesso, eseguite per campioni e con rimozione di uno strato del rivestimento esistente, consenta una ridistribuzione delle tensioni in modo da coinvolgere nell'impegno statico, almeno in parte, anche il nuovo rivestimento.
Sarebbe infatti necessario, a rigore, rimuovere l'ipotesi di conservazione delle sezioni piane, seguire nel dettaglio la storia di carico relative alle varie sezioni, verificare le caratteristiche dei collegamento fra vecchio e nuovo, etc. Tali indeterminazioni possono essere riassorbite dai normali coefficienti di sicurezza previsti nel metodo delle tensioni ammissibili e comunque risultano inferiori a quelle dello stato tensionale effettivamente presente nell'opera in oggetto con l'attuale stato di conoscenza
Di seguito vengono riportate le principali ipotesi di calcolo che hanno condotto alla determinazione delle sollecitazioni nella struttura e alla determinazione delle tensioni massime sia nel caso di rivestimento originario sia in quello di rivestimento rinforzato.

NORMATIVA Dl RIFERIMENTO
Il dimensionamento e le verifiche statiche degli elementi strutturali trattati nella presente relazione sono stati condotti secondo i metodi della scienza delle costruzioni e nel rispetto della normativa in vigore.
In particolare si è fatto riferimento a:
- D.M. 11.3.1988: "Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione" e relative istruzioni;
- Legge 5.1 1.1971 n.1086 e D.M-. 14.2.1992: " Norme per la disciplina delle opere in cemento armato, normale e precompresso ed a struttura metallica" e relative istruzioni;

CARATTERISTICHE DEI MATERIALI -
Nelle presente relazione per le verifiche delle strutture esistenti, realizzate in conglomerato cementizio non armato, la tensione di compressione massima ammissibile è assunta pari a:
$\sigma c = 6.00$ N / mm2
La resistenza a trazione teorica del conglomerato non armato è assunta pari a:
fclm = 2.30 N/mm2.
Per le verifiche a lungo termine ed in condizioni di materiale degradato si è trascurata la resistenza a trazione del materiale.
Per i nuovi elementi strutturali in cemento armato è previsto l'impiego di calcestruzzi con Rck ≥
25 N/mm2 e armature ad aderenza migliorata tipo FeB44k.
Le tensioni ammissibili corrispondenti risultano essere:
Calcestruzzo:
$\sigma c = 8.50$ N/mm2
$\tau co = 0.53$ N/mm2
$\tau c1= 1.68$ N/mm2

Acciaio:
$\sigma s = 255$ N/mm2
Dato che le strutture risultano essere contro terra i tassi di lavoro delle armature vengono ridotti cautelativamente ai seguenti valori ammissibili: $\sigma s = 180$ N/mm2

METODO DI CALCOLO
Il calcolo delle sollecitazioni agenti nelle strutture è stato effettuato con il metodo degli elementi finiti monodimensionali.
Nella schematizzazione della galleria si sono adottati elementi monodimensionali di tipo “trave”, mentre l’interazione della struttura con il terreno è simulata con una serie di molle applicate ai soli nodi della struttura che hanno una componente di spostamento in direzione esterna alla sezione.
La rigidezza delle molle è proporzionale alla risposta elastica del terreno ed il programma di calcolo utilizzato consente di stabilire automaticamente in quali nodi le molle sono attive.
La struttura della galleria è stata schematizzata con 56 elementi trave, con spessore differente
a seconda della sezione considerata.
Gli elementi trave hanno un comportamento elastico lineare, in particolare il modulo elastico è stato assunto pari a 25.000 Mpa, mentre il coefficiente di Poisson adottato è 0.25.
Per motivi legati al codice di calcolo utilizzato le unità di misura adottate per le verifiche risultano essere le t ed i m, oppure i kg e i cm.

SCHEMA DI CARICO

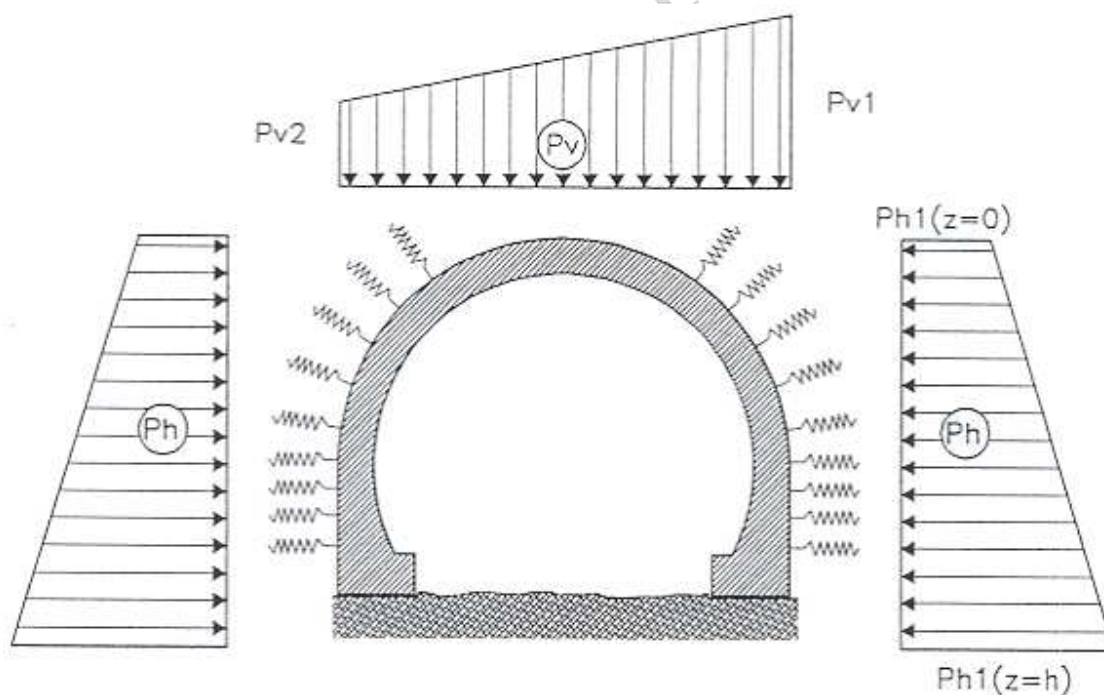



Fig. 1

CARICHI E COMBINAZIONI DI CARICO

I carichi gravanti sulle strutture della galleria artificiale risultano essere:
carico litostatico;

peso proprio della struttura;
reazione di contrasto del terreno;
Il carico litostatico è determinato in funzione dello spessore del ritombamento e risulta pari al peso del terreno gravante (Pv).
La componente di spinta orizzontale (Ph) è stata valutata in funzione del coefficiente Ko di spinta a riposo secondo la relazione:
$Ph = (Pv + \gamma z) Ko$
dove:
Pv = carico verticale
z = distanza relativa tra il punto considerato e l'estradosso di calotta
γ = peso specifico del terreno
Ko = coefficiente di spinta a riposo
Data la particolare configurazione morfologica del terreno è stato considerato un carico gravante non simmetrico, legato allo spessore del ricoprimento in corrispondenza del piedritto di destra (Pv1) e di sinistra (Pv2) (ved. :fig.1).

Nella determinazione dei carichi si è assunto un angolo di pendio pari a circa 20°.
Per la determinazione delle spinte dei terreno sono stati adottati i seguenti parametri geotecnici:

Tipo	γn [KN/m3	c' [KPα]	ϕ [°]	ka	Et [MPα]
Materiale di ritompamento	19	0	30	0,44	150

dove:
γn = peso di volume
c' = coesione
ϕ = angolo di attrito
Ko = coefficiente di spinta laterale
Et = modulo di reazione elastica del terreno
Con riferimento alla fig. 1 i carichi gravanti sulle strutture assunti per le verifiche risultano essere:

Pv1= 18.50 t/m2 PH1(Z = 0) = 8.14 t/m2 PH1 (z = 10.50) = 16.92 t/m2
Pv2 = 6.65 t/m2 PH2(Z = 0) = 2.93 t/m2 PH2 (z = 10.50) = 1 1.70 t/m2

VERIFICA DELLE SEZIONI
Per verificare se lo stato di sollecitazione nella struttura risulta compatibile con le caratteristiche di resistenza della sezione sono stati ricostruiti i domini resistenti secondo le ipotesi delle tensioni ammissibili. Tali domini sono definiti dal raggiungimento delle tensioni ammissibili massime di compressione nel calcestruzzo al lembo compresso e di trazione nell'armatura. Nel caso di sezione non armata si ipotizza la parzializzazione della sezione resistente (resistenza a trazione nulla del ca1cestruzo) con conseguente diminuzione della sezione reagente.
Se il punto rappresentante le azioni agenti nella sezione analizzata ricade all'interno del dominio le tensioni conseguenti risulteranno minori di quelle ammissibili. Se invece tale punto risulta esterno le tensioni massime nella sezione supereranno i valori ammissibili assunti.

Nel caso in esame sono stati ricreati due domini caratteristici: uno per la sezione prevista in progetto (fig. 2) ed un secondo per la nuova sezione rinforzata (Fig. 3).

Verifica sezione di progetto
Dalle analisi dei risultati si ottengono delle sollecitazioni che generalmente risultano compatibili con le tensioni ammissibili previste essendo la struttura non armata, in presenza di momenti significativi la sezione reagente si parzializza: la zona tesa del calcestruzzo risulta fessurata e la sezione reagente si riduce, rispetto all'intera sezione geometrica, alla sola parte compressa.
In alcune zone del rivestimento le sollecitazioni ottenute dal calcolo raggiungono i valori ammissibili previsti.
Se invece nelle verifiche si considera una certa resistenza minima a trazione del calcestruzzo le sollecitazioni risultano ancora compatibili con i valori ammissibili adottati.
Se consideriamo ad esempio l'elemento 3 le azioni agenti risultano essere:
N = 69.90 t/ml M = 11.60 tm/ml le sollecitazioni considerando la sezione completamente reagente risultano essere pari a:

$\sigma max = N/A + M/W$ $\sigma min = N/A – M/W$
da cui σmax= 42 Kg/cm2 σmin = -14 Kg/cm2
ancora compatibili con i valori ammissibili.
Se invece si calcolano le tensioni massime considerando la sezione parzializzata risulta:
$\sigma max = 2 N/3 (H/2 – e)$

da cui risulta: σmax = 58.3 Kg/cm2
Il valore della tensione massima nella sezione è prossima al valore ammissibile (σc=60 Kg/cm2) ed infatti il punto ricade sulla superficie a rottura.
A seguito di un possibile fenomeno di degrado le proprietà di resistenza meccanica del calcestruzzo possono diminuire con il tempo. La resistenza a trazione può ridursi sensibilmente e l'alterazione superficiale del rivestimento può modificare lo spessore della sezione reagente. Tale situazione corrisponde ad una riduzione del dominio resistente con il conseguente superamento della soglia di ammissibilità in alcuni punti del rivestimento.
Inoltre le zone che risultano sottoposte a trazione all'intradosso della galleria possono manifestare situazioni di distacchi localizzati per perdita della resistenza a trazione del calcestruzzo.
Tale condizione non significa necessariamente che il rivestimento è a rottura, ma, entro certi limiti di sollecitazione, che non sono più garantiti i coefficienti minimi di sicurezza propri del metodo delle tensioni ammissibili (Fs > 3).

Verifica sezione rinforzata
In modo analogo è stato ricostruito il dominio della sezione rinforzata, considerando uno spessore aggiuntivo di 20 cm ed un'armatura addizionale costituita da rete elettrosaldata ϕ10/20x20.
Come è possibile osservare dal diagramma riportato in fig. 3 tutti i punti che rappresentano le azioni nella sezione analizzata risultano ampiamente all'interno del dominio resistente.
I coefficiente di sicurezza minimo raggiunto, secondo le ipotesi di calcolo adottate, risulta notevolmente maggiore di quello previsto con la sezione di progetto (Fs > 5-ó)
Tale situazione è comunque da considerarsi come un limite superiore. Infatti, se si considera che i nuovi interventi risultano effettuati su una struttura esistente già sotto carico e che la

solidarizzazione fra le due strutture potrebbe essere :localmente poco efficace, è possibile immaginare che la situazione reale risulterà intermedia fra le due ipotizzate.
E' comunque da notare che non sempre un aumento della sicurezza locale della sezione corrisponde ad un pari aumento della sicurezza globale della struttura. Esistono infatti dei punti in cui non è possibile intervenire direttamente (zone di estradosso, arco rovescio, fondazioni,...) e che ragionevolmente ridurranno tale valore.

DOMINIO DI RESISTENZA ALLE TENSIONI AMMISSIBILI
SEZIONE DI PROGETTO

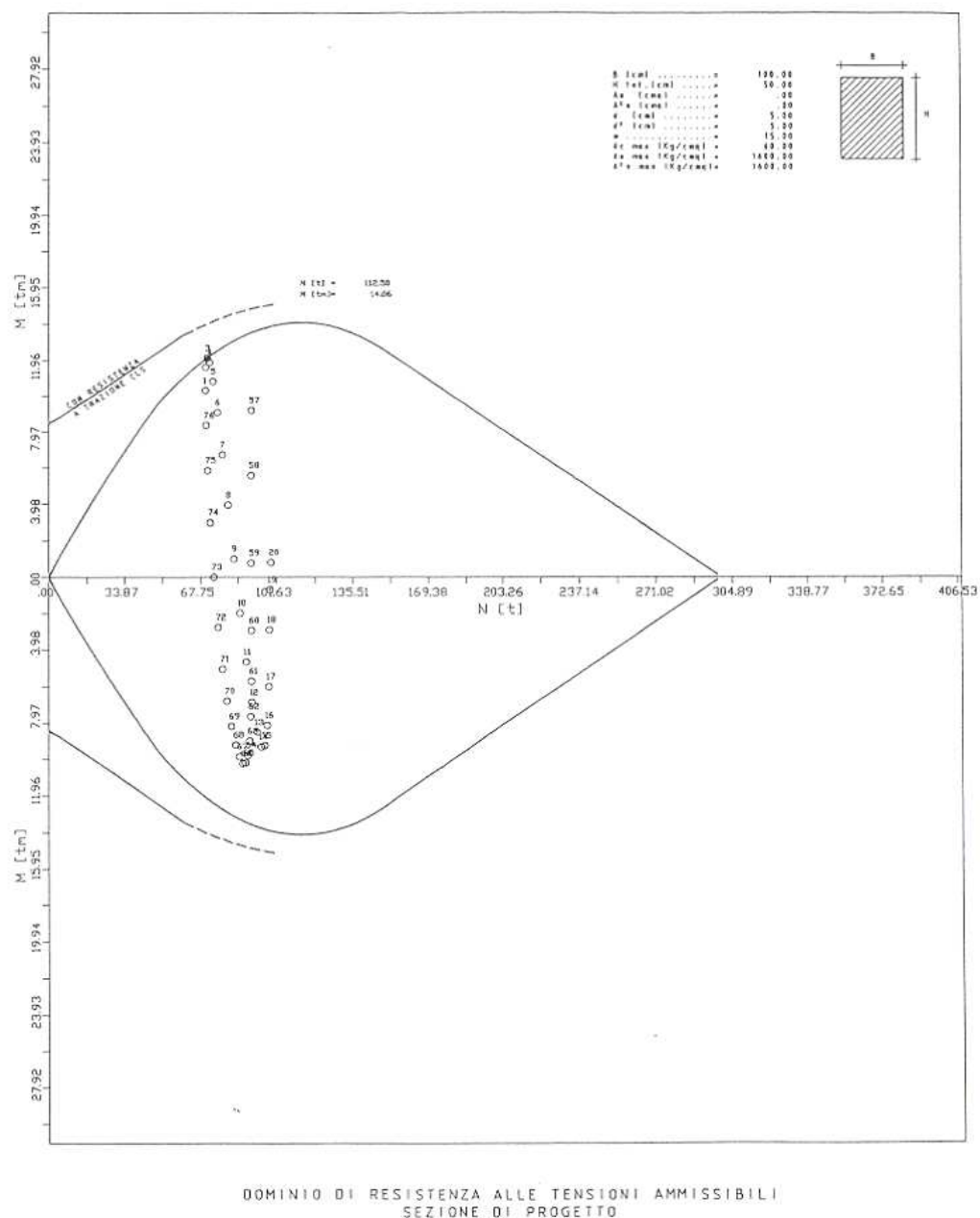



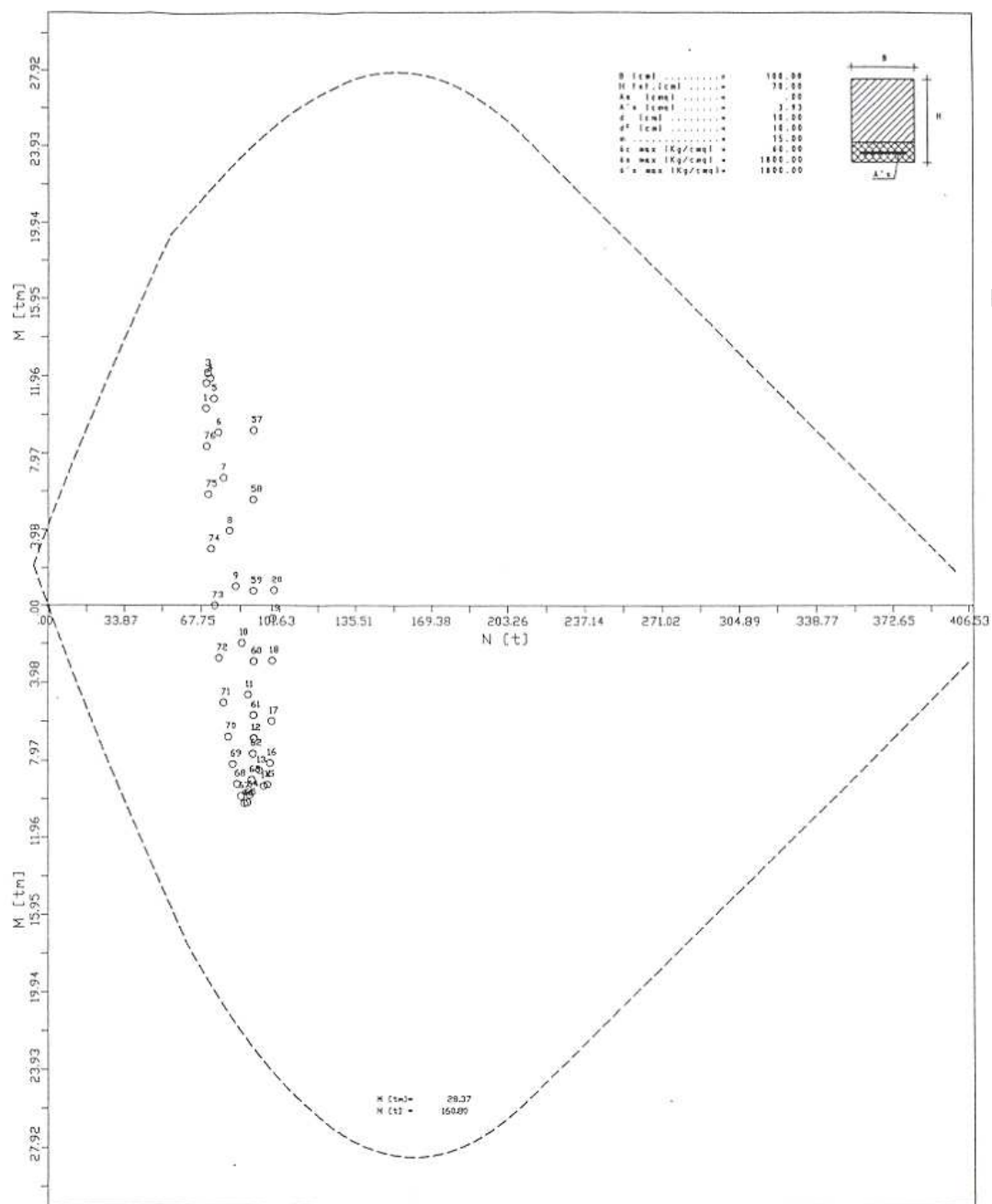
Fig. 2

M [tm]
N [t]
M [tm]
DOMINIO DI RESISTENZA ALLE TENSIONI AMMISSIBILI
SEZIONE RINFORZATA

Fig. 3

APPENDICE PRINCIPALI RISULTATI DELL'ANALISI

Fig. 4

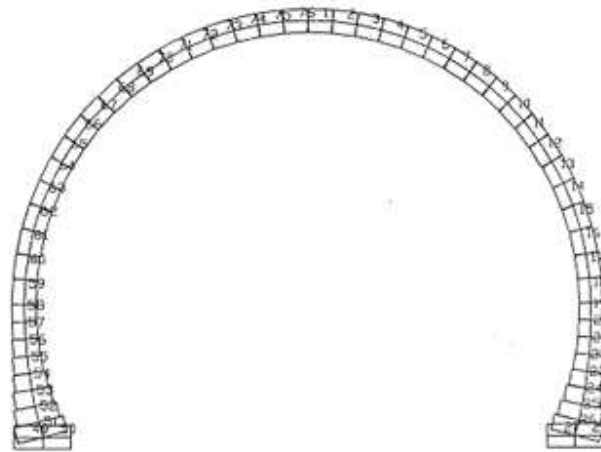



Fig. 5

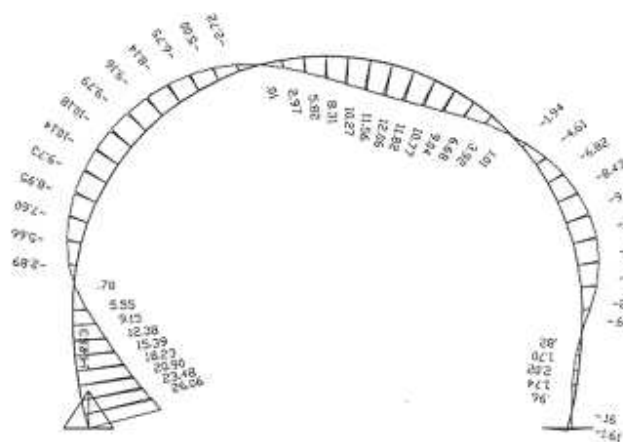
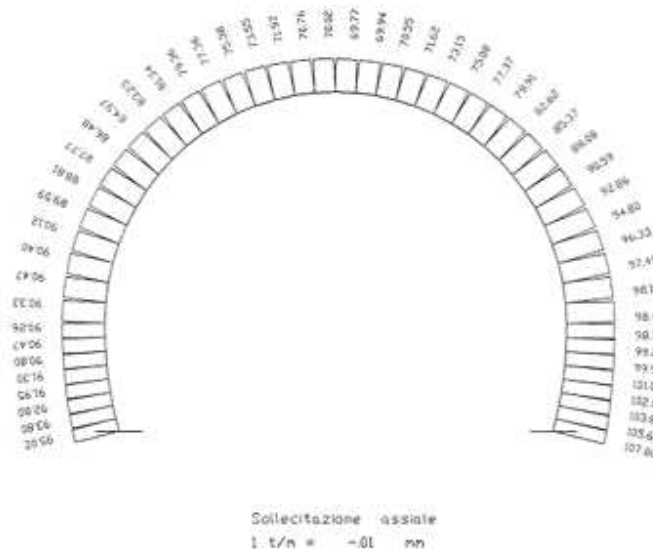



Fig. 6

Per entrambe le gallerie si è valutato quindi di prevedere un rinforzo con valenza strutturale significativa che potesse ridare al rivestimento solida continuità e che riportasse le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo a valori adeguati; inoltre si è voluto prevedere un rivestimento finale che offrisse protezione al cls ed efficace effetto impermeabilizzante su tutta la superficie del fornice.

PLANIMETRIA DI TRACCIAMENTO – GALLERIA VOLTE – scala 1:200

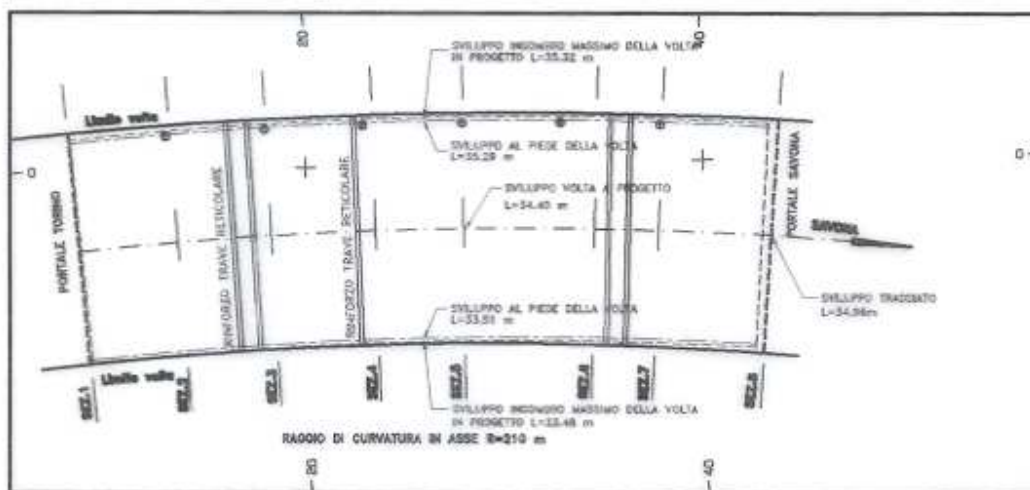



Fig. 7

La scelta progettuale si è orientata perciò sulla realizzazione di un sottoarco in cemento armato gettato in opera con effetto di rinforzo consolidante, da solidarizzare completamente ed efficacemente con il rivestimento esistente, che consentisse tra l’altro attraverso nuove sezioni di progetto, di regolarizzare il più possibile la geometria della galleria. Il nuovo raggio delle sezioni di progetto ha consentito comunque il posizionamento di due corsie da m 3.75 oltre ai franchi laterali, senza penalizzazioni dei franchi definitivi in altezza.

Sezioni Fig. 8

Per valutare il miglioramento apportato dalle strutture di rinforzo previste, alla statica della galleria, è stata condotta un’analisi strutturale degli elementi finiti per riprodurre le caratteristiche di sollecitazione a cui presumibilmente risulta soggetta l’opera.

Fig. 9 Fig. 10

Non avendo a disposizione i calcoli statici di progetto si è ipotizzata, come condizione più gravosa, un carico gravante sulla galleria pari al peso del terreno di ricoprimento, assunto con caratteristiche geotecniche medie per materiali analoghi nella zona; si è assunta inoltre una condizione di spinta laterale prossima al valore di spinta a riposo Ko. Sono stati altresì considerati gli effetti asimmetrici della spinta conseguente all’inclinazione del versante interessato dall’opera. Attraverso queste elaborazioni numeriche si sono determinate le sollecitazioni massime presunte sia nelle strutture originarie che in quelle conseguenti ai

lavori di rinforzo previsti, e si sono potute verificare le condizioni di impegno dei materiali evidenziando gli effetti benefici prodotti dall'intervento, sia di incremento della sicurezza locale nella sezione, che di miglioramento della sicurezza globale dell'opera nel suo complesso.

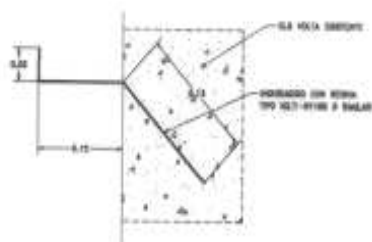



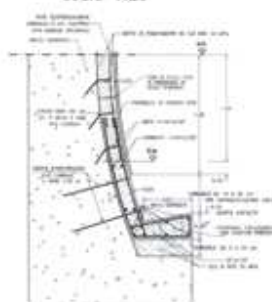
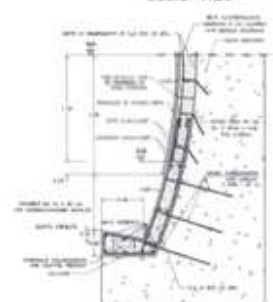
Fig 11 Fig. 12

Nelle verifiche delle sezioni si è ipotizzata una perfetta aderenza fra la vecchia struttura e la nuova: tale ipotesi è avvalorata tanto dal preventivo irruvidimento delle superfici di contatto quanto dalle chiodature previste, che consentono la trasmissione delle forze di scorrimento fra le due parti strutturali chiamate a collaborare congiuntamente.

Foto 1

Foto 2

Per migliorare la collaborazione stretta del nuovo calcestruzzo con il vecchio, è stata prevista infatti la rimozione degli strati alterati ed una accurata pulizia delle superfici.
Alla base del piedritto sono state previste due murette in c.a., ancorate e rese solidali con il piedritto tramite opportune chiodature metalliche.
In entrambe queste murette è stata ricavata alla base una canaletta per l'allontanamento delle acque raccolte dall'impermeabilizzazione.

Oltre alla realizzazione del sottoarco è stata prevista la posa di un rivestimento speciale in pannelli calandrati in lamiera grecata in acciaio inox AISI 304 da fissare con tasselli di ancoraggio ad espansione in nylon e vite sempre in acciaio inox, con funzione protettiva della calotta, e di regimazione drenante delle copiose infiltrazioni d'acqua presenti.

Interventi eseguiti
L'intervento per la realizzazione delle opere previste si è sviluppato in varie fasi successive con un sistema studiato ed attuato per garantire per tutto il tempo di durata del cantiere il transito del traffico nelle gallerie, sia pure ridotto su un'unica corsia centrale.
La garanzia di mantenimento della percorribilità al traffico è stato un requisito di fondamentale importanza, richiesto dalla Concessionaria Autostradale in un contesto dove per ragioni di tracciato risulta fisicamente impossibile chiudere le gallerie al traffico eseguendo scambi di carreggiata.

Foto 3

Cordoli di fondazione
La prima fase di intervento è costituita dalla costruzione della fondazione in c.a. del sottoarco preceduta dallo scavo di trincee laterali adiacenti ai piedritti previo taglio della pavimentazione mediante seghe a disco che garantiscono la realizzazione di un taglio netto lineare necessario per non danneggiare la pavimentazione esistente.
Dopo una regolarizzazione del fondo scavo con calcestruzzo si è proceduto alla posa dell'armatura ed alla realizzazione della fondazione a cordolo continuo in c.a. necessario per consentire il passaggio del carro portaforme utilizzato successivamente, e soprattutto per costituire un robusto basamento delle murette di ancoraggio, realizzate subito dopo fino all'altezza di circa 1m , legate mediante tirafondi al paramento esistente.
Tale getto costituisce la base di appoggio e di partenza del sottoarco armato.
Preparazione delle superfici della volta esistente mediante l'utilizzo di un carro tubolare schermato a portale, realizzato su misura per le gallerie in oggetto, si è proceduto all'idrosabbiatura di tutte le superfici, all'asportazione di tutti gli strati corticali ammalorati o comunque a rischio di distacco, ai disgaggi ed alle demolizioni di tutti i blocchi isolati, fratturati ed in precaria stabilità, all'apertura di tutte le lesioni, così da realizzare una superficie pulita e pronta in modo da garantire le migliori condizioni di "aggrappo" del nuovo calcestruzzo con l'esistente.

Foto 4

Foto 5

Posa della rete elettrosaldata

E’ stato eseguito un fitto sistema di ancoraggi su tutta la superficie della calotta a maglia regolare 60 x 60 cm, realizzati mediante chiodi di ancoraggio in acciaio inghisati nel calcestruzzo con resine epossidiche in modo da garantire un collegamento continuo del nuovo strato da gettare con l’intradosso esistente, e consentire l’aggancio delle reti di armatura. Dopo aver ravvivato adeguatamente le superfici si è proceduto infatti alla posa sistematica di rete metallica elettrosaldata in doppio strato: il primo avvicinato al paramento mentre il secondo è stato fissato a circa 15 cm. dal precedente grazie ai chiodi sopracitati.

Foto 6

Per fornire un rinforzo ulteriore ai punti più deboli della calotta sono state previste localmente alcune centine reticolari calandrate in acciaio, parzialmente incassate nel calcestruzzo esistente previo scavo di apposite crene per poi annegarle nel nuovo getto.

Nuovo sottoarco in calcestruzzo

Il sottoarco a causa dell’irregolarità della vecchia calotta, è risultato di spessore variabile in funzione dei punti con una media di cm. 22 , in parte per necessità costruttive ed in parte per necessità strutturali.

Particolare cura è stata posta per garantire ovunque un copriferro minimo di 5 cm.

Per il getto del rivestimento in cls. è stato utilizzato un grosso carro portaforme su ruote gommate appositamente realizzato.

Foto 7

Tale carro portaforme è costituito da un portale in carpenteria metallica realizzato per consentire il mantenimento di un franco libero per il traffico di m 5,00 in altezza e m 4,20 in larghezza.

Attraverso sistemi idraulici consente gli spostamenti sia verticali che laterali dei pannelli calandrati di cassaforma da esso supportati, movimenti necessari per un perfetto allineamento della casseratura alla geometria curvilinea di progetto; tale flessibilità si è dimostrata indispensabile soprattutto in considerazione della variabilità ed irregolarità della geometria delle opere.

Il carro è dotato inoltre di puntoni di fissaggio per assorbire le spinte dei getti, alette accessorie di prolunga per assorbire le differenze di sviluppo tra esterno ed interno curva, nonché sportelli per l'ispezione dei getti in Cls.

Foto 8

Attenzione particolare e stata nel riguardo del confezionamento del calcestruzzo visto che gli getti sono stati eseguiti nei mesi invernali, è stata posta quinti una attenzione particolare allo sviluppo delle resistenze con classe di resistenza Rck >= 30 Mpa Le resistenze richieste dalla Direzione Lavori per eseguire gli scasseraggi (almeno 10,0 Mpa) sono stati raggiunti alle breve stagionature all'impasto n°4 (a 24 ore abbiamo ottenuto 26,4 Mpa) Per ogni getto venivano confezionati n° 8 cubi di dimensione 15X15X15 cm

I risultati sono stati i seguenti

	1 giorno (Mpa)	2 giorni (Mpa)	7 giorni (Mpa)	28 giorno Mpa)
Prova	26,4	39,2	52,1	59,3

Al momento del prelievo del prelievo sono stati rilevati i seguenti dati:
Slump: 18 cm Temperatura: 6° C con l’utilizzo di cemento di classe 52,5 tipo 1
Inoltre si e dovuto tener conto di fare integrare il più possibile il calcestruzzo vecchi con il nuovo cercando di ottenere un corpo unico più omogeneo possibile, il getto è stato eseguito mediante l’uso di pompe in conci successivi di 6 m di lunghezza.
La pompa, e di conseguenza l’autobetoniera che la alimenta, sono state piazzate da una parte della galleria a distanza sufficiente dal carro a portale per consentire il transito agevole degli automezzi.
In fase di getto si è dovuta assicurare una particolare attenzione alla distribuzione del calcestruzzo sui due paramenti in modo da mantenere assolutamente lo stesso livello del getto su ambo i lati. Tale accorgimento è stato necessario per evitare sbilanciamenti e squilibri nelle spinte indotte dal calcestruzzo fresco.
Il cls utilizzato ed il controllo sistematico della relativa maturazione ha consentito il disarmo mediamente a circa 24 ore dal getto per lo spostamento rapido sul concio successivo. Inoltre nel getto di calcestruzzo in presenza delle venute d’acqua sono stati inseriti dei tubi in P.V.C. di diametro adeguato per lo scolo delle stesse.

Foto 9

Tale sistema ha consentito una accelerazione notevole dei lavori permettendo di completare tutte le opere previste sulle due gallerie Volte e Vapea in due mesi complessivamente.

Rivestimento finale in acciaio inox

A completamento dei lavori è stato eseguito il posizionamento dei pannelli di rivestimento strutturale impermeabile autoportante per volte e gallerie tipo COVERtun composto da elementi grecati centinati HV 3060/5 con le seguenti caratteristiche :
- Altezza greca mm. 35
- Passo greca mm. 200
- Dimensione greca mm. 25x49
- parte piana mm. 151
- Irrigiditore trasversale sulla parte piana mm. 16

- Raggio curva mm.   5.600
- Larghezza lastra mm.   1.000
- Lunghezza lastra mm   2.900 – 5.500
- Spessore mm. 5/10
- Materiale acciaio inox AISI 304 B2

Colore naturale

Foto 10

Foto 11

Gli elementi sono stati posti in opera previo fissaggio avvenuto direttamente sul cls della volta delle gallerie   opportunamente fissati mediante viti in acciaio inox diametro mm. 7 lunghezza mm. 120 ancorati a tasselli ad espansione in nylon diametro mm. 10 e lunghezza mm. 120, con facilità di ripristino nel caso di sostituzione di necessità di alcuni elementi.
Fra la testa esagonale delle viti con finta rondella incorporata e le greche degli elementi è stata posizionata una piastra di ripartizione del carico in acciaio inox a forma rettangolare stampata con irrigiditore che si adatta perfettamente alla sagoma della greca. Nella parte superiore di detta piastra vi trova alloggio una guarnizione in resine espanse avente lo scopo di impedire il passaggio anche minimo di acqua attraverso i fori del pannello.
I pannelli di lamiera grecata inox tipo COVERtun, già tagliati a misura secondo le risultanze dei rilievi puntuali effettuati in fase di progettazione, sono stati preparati per la posa in opera, compresi fori per l'ancoraggio, previsti i pezzi speciali sia per il rivestimento delle testate che per sopperire al maggior raggio delle gallerie in curva. La scelta dell'acciaio inox AISI 304 con finitura 2 B ed in particolare il sistema COVERtun per il tipo di greca centinata consentono sia una maggiore raccolta di acqua di percolazione sia una maggiore portata di eventuali carichi di spinta, sia un buona resistenza all'attacco di agenti aggressivi (come il calcare) che ne garantiscono la durata nel tempo.

Foto 12

Foto 13

La tecnologia dei pannelli calandrati in acciaio inox può essere utilizzata con lo stesso metodo di fissaggio per risolvere altri problemi che si presentano nelle strutture in sotterraneo, in particolare : quelli relativi alla protezione dell'ambito della galleria dalle venute d'acqua; quelli relativi ai danni provocati nella roccia o nel rivestimento in calcestruzzo, dai cicli di gelo-disgelo, in presenza di acque di percolazione.